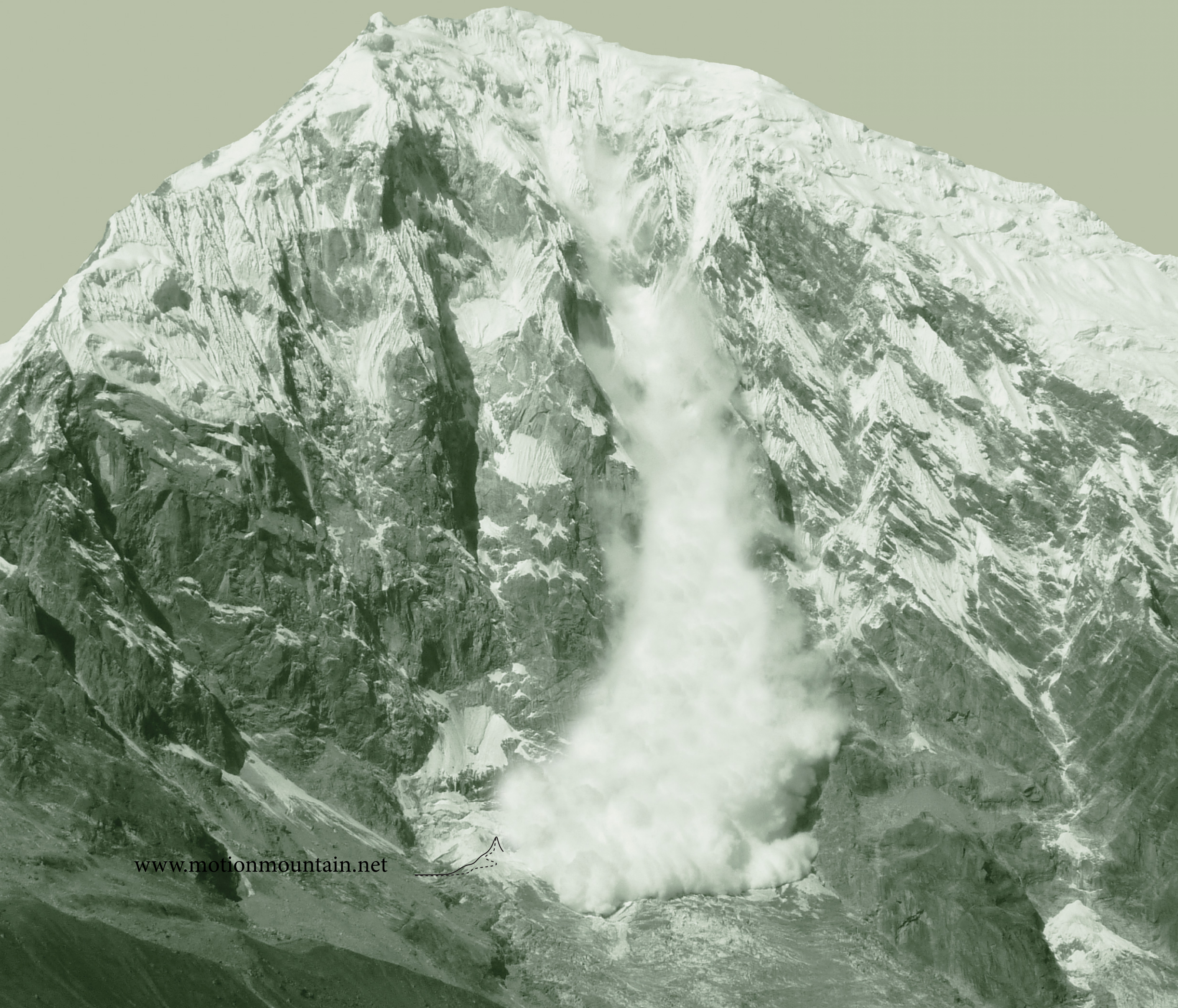
Christoph Schiller Dịch giả: Cao Sĩ Sơn

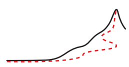
HÀNH SƠN

CUỘC PHIÊU LƯU CỦA VẬT LÝ – QUYỂN IV

LƯỢNG TỬ BIẾN ĐỔI



www.motionmountain.net



Christoph Schiller

Dịch giả: Cao Sĩ Sơn

Hành sơn

Cuộc phiêu lưu của Vật lý
Quyển IV

Lượng tử biến đổi

Ấn bản 31, có bản miễn phí dạng pdf kèm với
film tại trang web www.motionmountain.net

Editio vicesima nona.

Ấn bản thứ 31.

To Britta, Esther and Justus Aaron

τῷ ἐμοὶ δαὶμονι

Die Menschen stärken, die Sachen klären.

Lời mở đầu

> "Primum movere, deinde docere.*"
> Cổ nhân

Bộ sách này dành cho những người muốn tìm hiểu về chuyển động trong thiên nhiên. Sự vật, con người, động vật, hình ảnh và không gian chuyển động như thế nào? Câu trả lời dẫn tới nhiều cuộc phiêu lưu và quyển sách này trình bày những điều bắt nguồn từ việc khám phá ra là có một giá trị biến đổi khả hữu nhỏ nhất trong thiên nhiên. Giá trị biến đổi nhỏ nhất này, lượng tử tác dụng, dẫn ta đến với *Vật lý lượng tử*. Trong cấu trúc của vật lý hiện đại, như ta thấy trong Hình 1, Vật lý lượng tử bao trùm 4 trong 8 điểm. Quyển sách này giới thiệu về nền tảng của Thuyết lượng tử, giải thích cấu trúc của nguyên tử và sự xuất hiện của xác suất, hàm sóng và màu sắc.

Quyển sách nhập môn về Vật lý lượng tử này nảy sinh từ ba mục đích mà tôi đã theo đuổi từ năm 1990: trình bày những điều cơ bản về chuyển động lượng tử theo phương thức đơn giản, hiện đại và hấp dẫn.

Với mục đích *đơn giản*, quyển sách sẽ tập trung vào các khái niệm và giới hạn phần toán học ở mức tối thiểu. Việc tìm hiểu các khái niệm vật lý được ưu tiên hơn việc sử dụng các công thức tính toán. Kiến thức của quyển sách chỉ ở trình độ của sinh viên đại học.

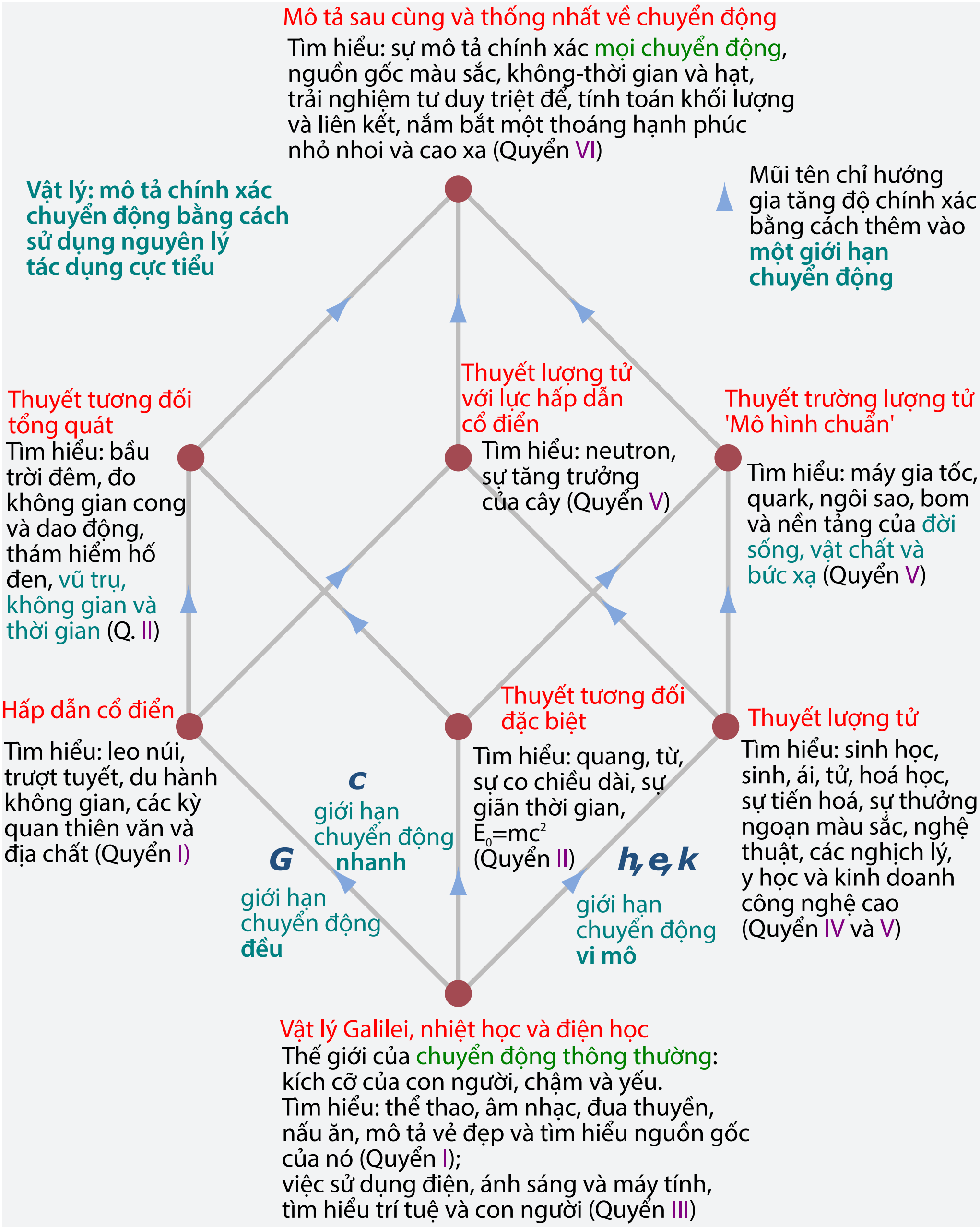
Với mục đích *hiện đại*, quyển sách sở hữu rất nhiều các tư liệu quý – cả lý thuyết lẫn thực nghiệm – rải rác trong nhiều tài liệu khoa học.

Với mục đích *hấp dẫn*, quyển sách sẽ cố gắng làm cho độc giả ngạc nhiên thật nhiều. Việc đọc một quyển sách vật lý đại cương sẽ giống như đi xem ảo thuật. Chúng ta xem, ngạc nhiên, không tin vào mắt mình, suy nghĩ và sau cùng ta hiểu được mánh lới của trò ảo thuật. Khi quan sát thiên nhiên, ta cũng có cùng một kinh nghiệm như thế. Thật vậy, mỗi trang sách đều chứa ít nhất một điều bất ngờ hay một sự khích động khiến độc giả phải ưu tư. Nhiều câu đố hấp dẫn đã được giới thiệu với độc giả.

Câu châm ngôn của quyển sách, *die Menschen stärken, die Sachen klären*, một phát biểu nổi tiếng về giáo dục, có thể dịch ra là: 'Làm cho con người trở nên mạnh mẽ, làm sáng tỏ mọi điều.' Việc làm sáng tỏ mọi điều – chỉ trung thành với sự thật – đòi hỏi sự can đảm, vì thay đổi tập quán suy nghĩ sẽ làm phát sinh sự sợ hãi, thường được che giấu bằng sự giận dữ.

Nhưng bằng cách vượt qua nỗi sợ hãi chúng ta sẽ trở nên mạnh mẽ đồng thời sẽ cảm nhận được những xúc cảm mãnh liệt và tốt đẹp. Mọi cuộc phiêu lưu vĩ đại trong đời

* 'Chuyển động trước, giáo huấn sau.' Trong ngôn ngữ hiện đại, *lay động* (trái tim) được gọi là *khuyến khích*; cả hai từ đều có cùng ngữ căn Latin.



HÌNH 1 Một bản đồ đầy đủ của vật lý, khoa học về chuyển động, được Matvei Bronshtein (b. 1907 Vinnytsia, d. 1938 Leningrad) giới thiệu lần đầu tiên. Hình lập phương Bronshtein bắt đầu từ dưới cùng với chuyển động thông thường và cho thấy các mối liên hệ của nó với các lĩnh vực vật lý hiện đại. Hướng của các kết nối biểu diễn sự gia tăng độ chính xác của việc mô tả nhờ các giới hạn được thêm vào. Giới hạn của chuyển động đều là hằng số hấp dẫn G, của chuyển động nhanh là tốc độ ánh sáng c, và của chuyển động của các hạt vi mô là hằng số Planck h, điện tích sơ cấp e và hằng số Boltzmann k.

đều cho phép điều này xảy ra và việc tìm hiểu về chuyển động là một trong những cuộc phiêu lưu đó. Hãy tận hưởng điều này.

Munich và Sài Gòn, 05-2020

Cách sử dụng sách

Những ghi chú bên lề sẽ chỉ đến các tham chiếu thư tịch, các trang khác hay lời giải của các câu đố. Trong ấn bản màu, ghi chú bên lề, chỉ dấu tới cước chú và liên kết đến các website được tô màu xanh lục. Theo thời gian, các liên kết internet có thể biến mất. Đa số các liên kết đều có thể phục hồi thông qua trang www.archive.org, nơi lưu giữ các bản sao của các trang web cũ. Trong ấn bản miễn phí của sách này dưới dạng pdf, sẵn có tại trang www.motionmountain.net, mọi chỉ dấu và liên kết xanh lục đều có thể truy cập được. Ấn bản pdf cũng chứa tất cả các film có thể xem trực tiếp bằng Adobe Reader.

Lời giải và gợi ý của các *câu đố* được cho trong phụ lục. Các câu đố được phân loại thành các mức độ dễ (e), học sinh bình thường (s), khó (d) và mức độ nghiên cứu (r). Các câu đố chưa có lời giải trong sách được đánh dấu (ny).

Lời khuyên dành cho học viên

Học tập cho phép ta thấy được mình trong tương lai, giúp ta mở mang kiến thức, phát triển trí thông minh và cảm thấy tự hào. Do đó, học tập từ sách vở, đặc biệt là sách về tự nhiên, sẽ hiệu quả và thích thú. Hãy tránh xa các phương pháp học tập tệ hại như tránh bệnh dịch! Đừng dùng bút đánh dấu hay viết chì để làm nổi bật hay gạch dưới văn bản trên trang sách. Điều đó làm ta mất thì giờ, không thoải mái và làm cho văn bản trở nên khó đọc. Đừng học từ một màn hình. Đặc biệt, không bao giờ, học từ internet, video, game hay smartphone. Phần lớn internet, video và game là độc dược và ma tuý đối với não bộ. Smartphone là các nhà bào chế ma tuý làm người ta nghiện ngập và không học hành gì được. Không có ai đánh dấu lên trang giấy hay nhìn vào màn hình mà học hành có hiệu quả hay thích thú làm những việc như vậy.

Theo kinh nghiệm học và dạy học của tôi, có một phương pháp học tập để biến đổi một học sinh không đạt thành một học sinh thành công: nếu bạn đọc sách để học tập, hãy tóm tắt các phần đã đọc, *bằng cách đọc thật to bằng ngôn ngữ và hình ảnh riêng của bạn*. Nếu bạn không làm được như vậy, hãy đọc lại phần đó. Lặp lại quá trình này cho đến khi bạn có thể tóm tắt được những gì bạn đã đọc bằng cách trên. *Hãy thưởng thức* niềm vui của việc lớn tiếng kể chuyện! Bạn có thể làm việc này một mình hay với bạn bè, trong một căn phòng hay trong khi đi bộ. Nếu thành công, bạn sẽ giảm được một cách đáng kể thời gian học hành và đọc sách. Bạn sẽ thích thú hơn trong việc học từ những cuốn sách hay và bớt ghét những cuốn sách dở. Người làm chủ được phương pháp này có thể dùng nó ngay trong lúc nghe giảng bài, nhưng hạ thấp giọng, và sẽ tránh được việc ghi bài triền miên.

Lời khuyên dành cho giáo viên

Giáo viên thường thích có học trò và thích hướng dẫn học trò thám hiểm lĩnh vực mà họ đã chọn. Nhiệt tình với công việc là nguyên tắc cơ bản cho sự thoả mãn trong nghề

nghiệp. Nếu bạn là một giáo viên, trước khi bắt đầu bài học, hãy tự hình dung, tự cảm nhận và tự nhủ về sự yêu thích chủ đề của bài học; tiếp theo bạn hãy tự hình dung, tự cảm nhận và tự nhủ về cách thức mà bạn sẽ dùng để hướng dẫn học trò của bạn có được sự yêu thích chủ đề đó giống như bạn. Hãy làm việc này một cách có ý thức, mỗi ngày. Bạn sẽ đỡ phải gặp các điều phiền toái trong lớp và thành công nhiều hơn trong việc giảng dạy của mình. Cuốn sách này không viết cho mục đích thi cử mà mục đích của nó là làm cho giáo viên và học sinh *hiểu* và *yêu thích* môn vật lý, khoa học của chuyển động.

Phản hồi

Ấn bản pdf mới nhất của bộ sách này đang và sẽ còn cho bạn đọc download miễn phí từ internet. Tôi rất mong nhận được email từ các bạn tại địa chỉ fb@motionmountain.net, đặc biệt về các vấn đề sau đây:

Câu đố 1 s

— Những điều chưa rõ ràng và nên cải tiến?
— Bạn chưa hiểu câu chuyện, chủ đề, câu đố, hình ảnh hay film nào?

Tôi cũng hân hạnh đón nhận sự góp ý của các bạn về các điểm đặc biệt liệt kê trong trang web www.motionmountain.net/help.html. Mọi phản hồi sẽ được sử dụng để cải tiến ấn bản kế tiếp. Bạn có thể gởi phản hồi bằng mail hay file pdf có thêm các ghi chú màu vàng, hay cung cấp các hình minh hoạ, hình chụp, hay đóng góp vào trang errata wiki trên website. Nếu bạn muốn dịch một chương của cuốn sách sang ngôn ngữ của bạn, vui lòng cho tôi biết.

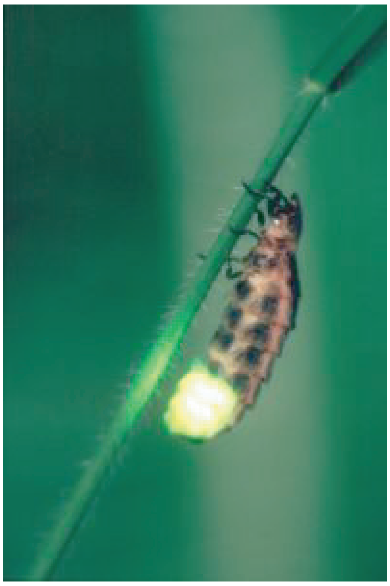
Thay mặt cho tất cả độc giả, xin cám ơn các bạn trước về các đóng góp này. Đối với các đóng góp đặc biệt hữu ích – nếu bạn muốn – bạn sẽ được ghi nhận trong phần cảm tạ, nhận quà thưởng, hay cả hai.

Trợ giúp

Chúng tôi rất hoan nghênh khi nhận được sự tài trợ từ các bạn cho tổ chức từ thiện, phi lợi nhuận (được miễn thuế) để soạn thảo, dịch thuật và phát hành bộ sách này. Để có thêm chi tiết hãy vào trang web www.motionmountain.net/donation.html. Sở thuế vụ của Đức sẽ kiểm tra việc sử dụng hợp thức nguồn tài trợ của bạn. Nếu bạn muốn, tên của bạn sẽ được ghi trong danh sách các nhà tài trợ. Thay mặt các độc giả trên toàn thế giới, chúng tôi xin cám ơn bạn trước.

Bản in trên giấy của bộ sách này, bản màu hay bản đen trắng, có bán trên www.amazon.com hay www.createspace.com. Và bây giờ, mời bạn thưởng thức cuốn sách.

Mục lục



Lượng tử biến đổi

Trong cuộc hành trình tìm hiểu quy luật vận động của sự vật,
ta khám phá ra là có một giá trị biến đổi nhỏ nhất trong thiên nhiên,
dẫn tới việc chuyển động có tính mờ,
những cái hộp không bao giờ kín,
vật chất được tạo thành từ các đơn vị sơ cấp,
ánh sáng và sự tương tác là các dòng hạt.
Giá trị nhỏ nhất này giải thích cho
sự hiện hữu của phản vật chất,
sự khác nhau giữa hạt với găng tay,
không có máy photocopy thực sự,
tính hợp lý của xác suất
và sự hình thành của màu sắc trong thiên nhiên.

CHƯƠNG 1

TÁC DỤNG CỰC TIỂU – THUYẾT LƯỢNG TỬ CỦA THI NHÂN

> “Natura [in operationibus suis] non facit saltus.**”
>
> thế kỷ 15

Trèo lên Hành Sơn tới điểm này, ta đã hoàn thành ba phần. Ta đã vượt qua Cơ học Galilei (mô tả chuyển động dành cho trẻ em), rồi tiếp tục với Thuyết tương đối của Einstein (mô tả chuyển động dành cho những người mê tiểu thuyết khoa học viễn tưởng) và sau cùng khám phá Điện động lực học của Maxwell (mô tả chuyển động dành cho các thương gia). Ba sự mô tả chuyển động cổ điển này đều ấn tượng, đẹp đẽ và hữu ích. Tuy vậy, chúng vấp phải một vấn đề nhỏ: tất cả đều sai. Lý do cũng đơn giản: không có phần nào mô tả *cuộc sống*.

Khi ta ngắm một đoá hoa hay một cánh bướm, như trong hình Hình 2, ta đã thưởng ngoạn những sắc màu tươi sáng, cử động, mùi hương hoang dã, dáng hình mềm mại và thanh tú hay những nét đối xứng tinh tế của chúng. Tuy vậy, ta đã biết rằng:

▷ Vật lý cổ điển không thể giải thích được bất kỳ một chiều dài đặc trưng hay một thang đo thời gian nào trong thiên nhiên.

Hiện nay, hoa và động vật – nhưng cũng có nhiều hệ vô sinh – có kích thước, tầm cỡ, tỷ lệ và nhịp điệu đặc trưng. Thực ra, vật lý cổ điển không thể giải thích được nguồn gốc của chúng, vì

▷ Các hằng số cổ điển của thiên nhiên – hằng số hấp dẫn G, hằng số khí lý tưởng R, tốc độ ánh sáng c, độ điện thẩm trong chân không ε_0 và độ từ thẩm trong chân không μ_0 – không cho phép ta định nghĩa thang đo chiều dài hay thời gian.

Các hằng số cổ điển cũng không cho phép ta đo tốc độ hay cường độ của lực, mặc dù các số đo này là một phần của c và c^4/G; vì để đo các giá trị này, ta cần định nghĩa chúng trước; nhưng việc định nghĩa lại cần các thang đo chiều dài và thời gian, điều mà vật lý cổ điển không cho phép.

Không có số đo, không còn cảm xúc! Thật vậy, giác quan kích khởi cảm xúc. Và trong mọi ấn tượng, thông tin mà các giác quan của chúng ta cung cấp có số đo. Vì Vật lý cổ điển không cung cấp thang đo, nên:

Xem 1

** ‘Thiên nhiên [trong khi vận hành] sẽ không nhảy.’



HÌNH 2 Thí dụ về máy lượng tử (© Linda de Volder).

▷ Vật lý cổ điển không cho phép ta tìm hiểu về cảm giác hay cảm xúc.

Lý do của tất cả các hạn chế này là từ mối liên hệ sau:

▷ Không thể sử dụng Vật lý cổ điển để xây dựng một dụng cụ đo.

Mỗi giác quan đều kèm theo dụng cụ đo. Mỗi dụng cụ đo, giống như một kiểu thức hay một khuôn mẫu, cần có một thang đo nội tại hay tổng quát hơn, một đơn vị đo nội tại. Vì Vật lý cổ điển không cung cấp thang đo nên nó không thể giải thích cách vận hành của dụng cụ đo, cách hoạt động của giác quan và cách xuất hiện cảm xúc.

Để hiểu được cảm xúc và đời sống, ta cần vượt *ra ngoài* phạm vi Vật lý cổ điển. Hãy lấy một thí dụ bất kỳ cho trường hợp thú vị này,* thí dụ như trời chiều rực rỡ, thác nước, một đứa bé hạnh phúc hay sự âu yếm. Vật lý cổ điển không giải thích được bất kỳ một điều nào trong các điều sau: Điều thứ nhất, màu sắc và nguồn gốc của nó vẫn còn là điều bí mật. Điều thứ hai, hình dạng, kích thước và tỷ lệ cũng vậy. Điều thứ ba, ta vẫn chưa hiểu cách xác định thời gian của các quá trình liên quan. Điều thứ tư, mọi cảm giác và cảm xúc do hoàn cảnh tạo ra vẫn còn là điều bí mật. Để hiểu và giải thích được những

Câu đố 2 s

* Hình ở Trang 14 cho thấy một đom đóm cái, *Lampyris noctiluca*, thường gặp ở Anh (© John Tyler, www.johntyler.co.uk/gwfacts.htm).

điều này, ta cần *Thuyết lượng tử*. Thật vậy, ta sẽ khám phá ra rằng cả *đời sống* và *mọi niềm hoan lạc* đều là các thí dụ của chuyển động lượng tử. Cảm xúc là các quá trình lượng tử.

Trong thuở ban đầu của Vật lý, việc không thể mô tả đời sống và sự hoan lạc không được xem là một trở ngại vì người ta không nghĩ rằng giác quan, các tính chất của vật chất hay các thang đo lại có liên quan tới chuyển động. Và sự hoan lạc không được xem là một đề tài nghiên cứu nghiêm túc đối với một nhà nghiên cứu đáng kính. Ngày nay, tình hình đã thay đổi. Trong cuộc phiêu lưu của chúng ta thì ta đã biết rằng các giác quan của chúng ta về thời gian, thính giác, xúc giác, khứu giác và thị giác trước tiên là *các máy phát hiện chuyển động*. Không có chuyển động, không có cảm giác. Thêm nữa, các máy này đều có cấu tạo là vật chất. Trong khi tìm hiểu về Điện từ học, ta đã bắt đầu hiểu rằng mọi tính chất của vật chất đều bắt nguồn từ chuyển động của các thành phần tích điện. Mật độ, độ cứng, màu sắc và mọi tính chất khác của vật chất đều là kết quả các hoạt động điện từ của những viên gạch vật chất Lego: cụ thể là các phân tử, nguyên tử và electron. Như vậy, các tính chất của vật chất cũng là hệ quả của chuyển động. Hơn nữa, ta đã thấy rằng những thành phần tí hon này *không được* Điện động lực học cổ điển mô tả đúng. Ta cũng đã thấy rằng ngay cả ánh sáng cũng không hành xử theo kiểu cổ điển. Do đó sự bất lực của Vật lý cổ điển trong việc mô tả vật chất, ánh sáng và cảm giác thực ra là do sự hạn chế nội tại của nó.

Quyển I, trang 410
Quyển III, trang 230
Quyển III, trang 246
Quyển III, trang 149

Đúng ra thì mọi thất bại của Vật lý cổ điển đều có thể truy nguyên về một phát kiến cơ bản, độc nhất vô nhị do Max Planck thực hiện năm 1899 :*

Xem 2

▷ Trong thiên nhiên, ta không thể quan sát được các giá trị tác dụng nhỏ hơn $\hbar = 1.06 \cdot 10^{-34}$ Js.

Mọi cố gắng quan sát các giá trị nhỏ hơn giá trị này đều thất bại.** Nói cách khác, trong thiên nhiên – giống như trong một cuốn film hay – luôn luôn có cảnh hành động. Sự hiện hữu của tác dụng cực tiểu – thường được gọi là *Nguyên lý lượng tử* – hoàn toàn

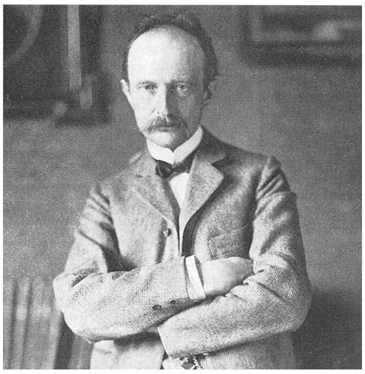
* Max Planck (1858–1947), giáo sư vật lý ở Berlin, là nhân vật chính trong lĩnh vực Tĩnh nhiệt học và Vật lý hiện đại. Ông đã khám phá và đặt tên cho *hằng số Boltzmann k* và *lượng tử tác dụng h*, thường được gọi là hằng số Planck. Bằng cách đưa ra giả thuyết lượng tử, ông đã khai sinh Thuyết lượng tử. Ông cũng đã làm cho cộng đồng vật lý biết đến các công trình của Einstein và sau này tìm việc cho Einstein ở Berlin. Ông đã nhận giải Nobel vật lý năm 1918. Ông là nhân vật chính yếu trong việc thiết lập nền khoa học Đức quốc; ông cũng là một trong một số ít người đã dũng cảm *nói thẳng* với Adolf Hitler rằng việc bắn những giáo sư người Do Thái là một điều tệ hại. (Ông nhận được một cơn thịnh nộ thay cho câu trả lời.) Ông được mọi người kính trọng và ngưỡng mộ vì đức khiêm tốn nhưng lại không may gặp nhiều bi kịch trong cuộc sống riêng tư.

** Đúng ra câu chuyện đã được đơn giản hoá đi một chút: ban đầu hằng số do Planck đưa ra là hằng số (không rút gọn) $h = 2\pi\hbar$. Hệ số 2π đứng trước trong nguyên lý lượng tử sau cùng do các nhà nghiên cứu khác thêm vào sau đó một thời gian.

Cách tiếp cận Thuyết lượng tử hơi khác thường, kể cả nhưng hữu ích này là của Niels Bohr. Ngày nay, mặc dù đơn giản nhưng ta khó gặp cách viết này trong sách vở.

Xem 3, Xem 4

Niels Bohr (b. 1885 Copenhagen, d. 1962 Copenhagen) là một trong các khoa học gia vĩ đại của vật lý hiện đại. Là một tư tưởng gia táo bạo và là một quý ông lịch lãm, ông đã biến Đại học Copenhagen thành một trung tâm phát triển Thuyết lượng tử mới, làm lu mờ cả Göttingen. Ông đã phát triển cách mô tả nguyên tử theo Thuyết lượng tử mà nhờ nó ông đã nhận được giải Nobel vật lý năm 1922. Ông phải rời Đan Mạch vào năm 1943 sau cuộc xâm lăng của người Đức vì gốc gác Do Thái của mình nhưng lại trở về sau khi chiến tranh kết thúc và tiếp tục thu hút các nhà vật lý lỗi lạc trên khắp thế giới.



HÌNH 3 Max Planck (1858–1947)



HÌNH 4 Niels Bohr (1885–1962)

Câu đố 3 s

tương phản với vật lý cổ điển. (Tại sao?) Dù có sự tương phản như vậy, Thuyết lượng tử đã trải qua một số lượng thí nghiệm kiểm chứng khổng lồ và ta sẽ gặp nhiều thí nghiệm trong số đó trong cuộc hành trình lên đỉnh của chúng ta. Điều chủ yếu là, nguyên lý lượng tử chưa bao giờ sụp đổ trước một thí nghiệm kiểm chứng nào. Hằng số cơ bản $\hbar$, phát âm là 'h gạch', được gọi là *lượng tử tác dụng*, hay *hằng số Planck*. Planck đã khám phá ra Nguyên lý lượng tử khi ông đang nghiên cứu về các tính chất của sự nóng sáng, tức là hiện tượng các vật nóng phát ra ánh sáng. Nhưng Nguyên lý lượng tử cũng áp dụng cho chuyển động của vật chất, và như sau này ta sẽ thấy, chuyển động của không gian trống rỗng như sóng hấp dẫn.

Quyển III, trang 149

Nguyên lý lượng tử phát biểu rằng không có thí nghiệm nào đo được một tác dụng nhỏ hơn $\hbar$. Trong một thời gian dài, Einstein đã cố nghĩ ra các thí nghiệm để vượt qua giới hạn này. Nhưng mọi cố gắng của ông đều thất bại: thiên nhiên không cho phép điều đó xảy ra như Bohr đã chỉ ra. Điều tương tự cũng đã xảy ra cho các nhà nghiên cứu khác.

Chúng ta có thể nhắc lại rằng trong Vật lý – giống như trong nhà hát – tác dụng là số đo *độ biến đổi* xảy ra trong một hệ thống. Như vậy Nguyên lý lượng tử có thể phát biểu như sau

Quyển I, trang 248

▷ Trong thiên nhiên, người ta không thể thấy một độ biến đổi nhỏ hơn $\hbar = 1.06 \cdot 10^{-34}$ Js.

Do đó, tác dụng cực tiểu hàm ý rằng *có một độ biến đổi nhỏ nhất trong thiên nhiên*. Nếu ta so sánh hai quan sát, luôn luôn có sự thay đổi giữa hai quan sát. Như vậy lượng tử tác dụng có lẽ nên được gọi tên là *lượng tử biến đổi* thì tốt hơn.

Biến đổi cực tiểu có hiện hữu trong thiên nhiên không? Để chấp nhận điều này, ta cần xem xét ba điều, được đề cập chi tiết trong Bảng 1. Ta cần chứng tỏ rằng người ta *không bao giờ thấy* độ biến đổi nhỏ hơn trong thiên nhiên, *có khả năng không bao giờ* thấy độ biến đổi nhỏ hơn, và sau cùng chứng tỏ rằng *mọi hệ quả* của độ biến đổi cực tiểu này, tuy có vẻ kỳ dị, có thể áp dụng trong thiên nhiên. Đúng ra ba điều này đã hợp thành toàn bộ Vật lý lượng tử. Do đó, việc kiểm tra là tất cả mọi điều ta cần làm trong phần còn lại của phần thám hiểm này. Nhưng trước khi ta xem xét một số thí nghiệm nhằm khẳng định sự hiện hữu của độ biến đổi cực tiểu, ta cần trực tiếp trình bày một

BẢNG 1 Cách bạn thuyết phục mình và những người khác là có một tác dụng hay biến đổi cực tiểu $\hbar$ trong thiên nhiên. So sánh bảng này với hai bảng khác trong Quyển II, nói về tốc độ cực đại ở trang 27 và nói về lực cực đại ở trang 112.

Phát biểu	Kiểm chứng
Giá trị của tác dụng cực tiểu $\hbar$ bất biến đối với quan sát viên.	Kiểm tra mọi quan sát.
Không quan sát được giá trị của tác dụng hay biến đổi địa phương $< \hbar$.	Kiểm tra mọi quan sát.
Không thể tạo ra giá trị của tác dụng hay biến đổi địa phương $< \hbar$.	Kiểm tra mọi nỗ lực.
Không thể tưởng tượng được giá trị của tác dụng hay biến đổi địa phương $< \hbar$.	Giải quyết mọi nghịch lý.
Giá trị của tác dụng hay biến đổi địa phương cực tiểu $\hbar$ là một nguyên lý của thiên nhiên.	Từ nguyên lý đó suy ra Thuyết lượng tử.
	Chứng tỏ rằng mọi hệ quả, dù khác thường, cũng được các quan sát khẳng định.

số hệ quả đáng kinh ngạc.

Ảnh hưởng của lượng tử tác dụng trên sự đứng yên

Vì tác dụng là số đo sự thay đổi, một tác dụng nhỏ nhất mà ta có thể quan sát được, đồng nghĩa với việc hai quan sát liên tiếp nhau của cùng một hệ phải khác nhau ít nhất là $\hbar$. Trong mọi hệ thống, luôn luôn có *một điều gì đó* đang xảy ra. Kết quả là:

▷ Trong thiên nhiên *không có sự đứng yên.*

Trang 15

Mọi vật luôn luôn chuyển động dù chỉ một chút xíu. *Natura facit saltus.** Thật vậy, những bước nhảy này rất nhỏ, vì $\hbar$ nhỏ đến nỗi không có giác quan nào của chúng ta nhận ra được. Tuy vậy, người ta chỉ quan sát được sự đứng yên ở mức vĩ mô và chỉ trong một thời gian dài hay số hạt trung bình lớn. Lượng tử tác dụng hàm ý rằng trong một ngọn núi – một 'hệ đứng yên' điển hình – mọi nguyên tử và điện tử đều quay cuồng liên tục. Tóm lại,

▷ Có chuyển động *bên trong vật chất.*

Vì có một tác dụng cực tiểu cho mọi quan sát viên, và vì không có sự đứng yên, ta suy ra:

* 'Thiên nhiên lúc nào cũng nhảy.'

▷ Trong thiên nhiên *không có chuyển động thẳng, đều, tuyệt đối.*

Hãy quên những điều bạn đã học từ trước đến nay: Chuyển động quán tính chỉ là một sự gần đúng! Một vật chỉ có thể chuyển động thẳng đều một cách gần đúng và chỉ khi ta quan sát trên một quãng đường dài hay trong một thời gian thật lâu. Sau này ta sẽ thấy rằng vật càng nặng thì sự gần đúng càng tốt. (Bạn có thể chứng minh điều này không?) Vì vậy các quan sát viên *vĩ mô* vẫn còn có thể nói về sự đối xứng không-thời gian; và như vậy Thuyết tương đối *đặc biệt* vẫn còn có thể tương thích với Thuyết lượng tử.

Câu đố 4 s

Tương tự, sự rơi tự do, hay chuyển động dọc theo một đường trắc địa, chỉ hiện hữu trong thời gian trung bình khá dài. Như vậy Thuyết tương đối *tổng quát*, dựa trên sự hiện hữu của các quan sát viên rơi tự do không còn đúng khi tác dụng chỉ vào cỡ $\hbar$. Thật vậy, sự tương thích giữa Nguyên lý lượng tử và Thuyết tương đối tổng quát – và với không gian cong – là một thách thức lớn. (Lời giải chỉ đơn giản đối với tương tác yếu hay các trường thông thường.) Vấn đề này làm cho người ta rối trí đến nỗi chúng được tách ra thành một phần riêng, sau cùng của cuộc thám hiểm. Như vậy, đầu tiên ta sẽ tìm hiểu các trường hợp không có lực hấp dẫn.

Các hệ quả của lượng tử tác dụng đối với các vật thể

Có khi nào bạn thắc mắc tại sao lá cây có màu lục không? Có thể bạn đã biết rằng chúng xanh lục vì chúng hấp thu ánh sáng xanh (bước sóng ngắn), đỏ (bước sóng dài) và phản xạ ánh sáng lục (bước sóng trung bình). Hệ thống đã làm thế nào để lọc ra hai ánh sáng đó và cho ánh sáng lục truyền qua? Để làm được như vậy, bằng cách nào đó, lá cây phải *đo được* tần số. Nhưng ta đã thấy rằng vật lý cổ điển không cho phép đo khoảng thời gian (hay chiều dài) vì một phép đo cần một đơn vị đo và vật lý cổ điển thì không cho phép định nghĩa các đơn vị như vậy. Mặt khác, người ta chỉ cần một vài dòng, cùng với sự trợ giúp của lượng tử tác dụng $\hbar$ (và hằng số Boltzmann k, cả hai đều do Planck tìm ra) để chứng minh rằng có thể định nghĩa các đơn vị cơ bản cho *mọi* đại lượng đo được, bao gồm thời gian và do đó cả tần số. (Bạn có thể tìm ra một tổ hợp của tốc độ ánh sáng c, hằng số hấp dẫn G và lượng tử tác dụng $\hbar$ để tạo ra thời gian không? Việc này chỉ mất vài phút thôi.)

Quyển I, trang 438

Câu đố 5 s

Tóm lại, các phép đo chỉ thực hiện được khi có lượng tử tác dụng.

▷ Mọi phép đo *đều là các hiệu ứng lượng tử.*

Khi Planck nhận thấy rằng lượng tử tác dụng cho phép người ta định nghĩa mọi đơn vị trong thiên nhiên, ông đã vui mừng như một đứa trẻ; ông biết ngay rằng mình đã khám phá ra một điều hết sức cơ bản, mặc dù (trong năm 1899) Thuyết lượng tử chưa ra đời. Thậm chí ông còn kể điều đó cho Erwin, đứa con trai 7 tuổi của ông, nghe trong khi hai cha con tản bộ trong khu rừng quanh Berlin. Planck giải thích cho con ông là mình đã khám phá ra một điều quan trọng tương tự như lực hấp dẫn vạn vật. Thật vậy, Planck biết rằng mình đã tìm ra chìa khoá để tìm hiểu nhiều hiện tượng mà lúc bấy giờ người ta chưa giải thích được.

Xem 5

▷ Trong thiên nhiên, *thời gian cũng như tần số đều bắt nguồn từ lượng tử tác dụng.*

Mọi quá trình mất thời gian đều là các quá trình lượng tử. Thí dụ, *đợi chờ* là một hiệu ứng lượng tử! Đặc biệt, không thể có dao động và sóng nếu không có lượng tử tác dụng:

▷ Màu sắc là một hiệu ứng lượng tử.

Nhưng đây chưa phải là tất cả. Planck cũng đã nhận thức được rằng lượng tử tác dụng cho phép chúng ta hiểu về *kích thước* của mọi vật.

▷ Kích thước là một hiệu ứng lượng tử.

Bạn có thể tìm ra một tổ hợp của c, G và $\hbar$ tạo thành chiều dài không? Sau cùng, nhờ lượng tử tác dụng, người ta đã có thể xác định kích thước cực đại của các ngọn núi, cây cối và con người. Planck đã biết rằng lượng tử tác dụng khẳng định những điều mà Galilei đã tìm ra trước ông rất lâu: kích thước bắt nguồn từ các thước đo cơ bản và nhỏ nhất trong thiên nhiên.

Quyển I, trang 337

Max Planck cũng đã hiểu rằng lượng tử tác dụng $\hbar$ là hằng số thiên nhiên *sau cùng còn thiếu*. Với $\hbar$, người ta đã có thể định nghĩa một đơn vị *tự nhiên* cho *mọi* tính chất có thể quan sát được trong thiên nhiên. Cùng với c, G và $\hbar$ cho phép ta định nghĩa các đơn vị độc lập với các nền văn hoá hay văn minh – thậm chí người ngoài Trái đất cũng hiểu chúng được.* Tóm lại, $\hbar$ cho phép ta tìm hiểu *mọi* biến động lực. Do đó, với $\hbar$ người ta có thể vẽ một sơ đồ như trong Hình 1 bao gồm *mọi* chuyển động trong thiên nhiên và *toàn bộ* vật lý.

Trong môi trường của chúng ta, kích thước của mọi vật đều có liên hệ và phụ thuộc vào kích thước của nguyên tử. Đến lượt kích thước của nguyên tử lại là hệ quả trực tiếp của lượng tử tác dụng. Bạn có thể tìm ra số đo gần đúng của kích thước nguyên tử, nếu biết rằng nó phụ thuộc vào chuyển động của electron có khối lượng m_e, điện tích e và bị ràng buộc bởi lượng tử tác dụng hay không? Mối liên hệ này, một công thức đơn giản, được Arthur Erich Haas khám phá vào năm 1910, 15 năm trước khi Thuyết lượng tử được thiết lập.

Câu đố 7 s

▷ Kích thước nguyên tử là một hiệu ứng lượng tử.

Vào thời đó, Haas bị nhiều người chế nhạo.** Ngày nay, công thức dành cho kích thước nguyên tử của ông được tìm thấy trong mọi sách giáo khoa, kể cả quyển sách này. Trong việc xác định kích thước nguyên tử, lượng tử tác dụng cho một hệ quả quan trọng khác:

Trang 187

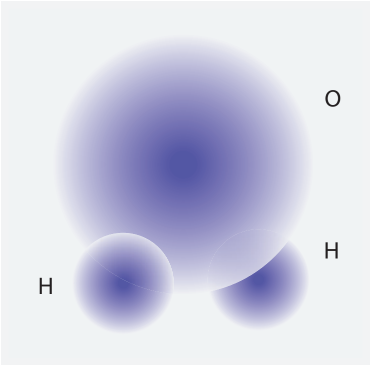
▷ *Cuộc phiêu lưu của Gulliver* không thể diễn ra.

Không có người tí hon cũng như người khổng lồ. Về mặt cổ điển, không có điều gì chống lại ý tưởng này; nhưng lượng tử tác dụng không cho phép. Bạn có thể cung cấp đầy đủ

* Đúng ra thì cũng có thể định nghĩa mọi đơn vị đo lường theo tốc độ ánh sáng c, hằng số hấp dẫn G và điện tích electron e. Tại sao điều này không hoàn toàn thoả đáng?

Câu đố 6 s

** Trước khi khám phá ra $\hbar$, thang đo chiều dài đơn giản duy nhất dành cho electron là tổ hợp $e^2/(4\pi\varepsilon_0 m_e c^2) \approx 3\,\text{fm}$; thang này nhỏ hơn nguyên tử 10000 lần. Ta cần nhấn mạnh rằng một thang đo chiều dài bất kỳ chứa e là một hiệu ứng lượng tử và không phải là một thang đo chiều dài cổ điển vì e là lượng tử của điện tích.



HÌNH 5 Tranh vẽ của một hoạ sĩ mô tả phân tử nước được tạo thành từ hai nguyên tử hydrogen (H) và một nguyên tử oxygen (O).

Câu đố 8 s

các luận cứ không?

Nhưng nếu không có sự đứng yên thì làm sao *hình dạng* tồn tại được? Hình dạng thông thường, bao gồm hình dạng của một đoá hoa, là kết quả của việc các phần của vật *đứng yên* đối với nhau. Bây giờ hình dạng là kết quả của sự tương tác giữa các thành phần của vật chất mà ta thấy rõ nhất trong hình dạng của các phân tử. Nhưng làm thế nào mà một phân tử như phân tử nước H_2O, trong Hình 5, có một hình dạng? Thật ra một phân tử không có một hình dạng *cố định* mà là một hình dạng thay đổi bắt nguồn từ lượng tử tác dụng. Dù thay đổi, mỗi phân tử đều có một hình dạng *chung*, do các góc và khoảng cách khác nhau tương ứng với các mức năng lượng khác nhau. Thêm nữa, các giá trị góc và khoảng cách trung bình này chỉ có được nhờ lượng tử tác dụng đã tạo ra những thang đo chiều dài cơ bản. Không có lượng tử tác dụng sẽ *không có* hình dạng trong thiên nhiên.

▷ Mọi hình dạng đều là các hiệu ứng lượng tử.

Mọi hình dạng thông thường đều bắt nguồn từ hình dạng của các phân tử hay là sự tổng quát hoá của chúng.

Khối lượng của một vật cũng là hệ quả của lượng tử tác dụng, như ta sẽ thấy sau đây. Vì mọi tính chất của vật chất – như mật độ, màu sắc, độ cứng hay độ phân cực – đều được định nghĩa như các tổ hợp của chiều dài, thời gian và đơn vị khối lượng, ta suy ra được:

▷ Mọi tính chất của vật chất đều phát sinh từ lượng tử tác dụng.

Tóm lại, lượng tử tác dụng xác định kích thước, hình dạng, màu sắc, khối lượng và tất cả các tính chất khác của mọi vật, từ các tảng đá cho đến kem sữa tươi.

TẠI SAO LẠI LÀ 'LƯỢNG TỬ'?

Các hiệu ứng lượng tử hiện diện khắp nơi chung quanh ta. Tuy vậy, vì lượng tử tác dụng quá nhỏ nên ảnh hưởng của nó trên *chuyển động* tuy nhiều nhưng không rõ ràng như trong các hệ *vi mô*. Việc nghiên cứu các hệ như vậy được Max Born, người có nhiều

BẢNG 2 Một số hệ thống nhỏ chuyển động và giá trị của các tác dụng quan sát được đối với sự biến đổi của chúng.

Hệ thống và sự biến đổi	Tác dụng	Chuyển động
Ánh sáng		
Lượng ánh sáng nhỏ nhất mà một bề mặt có màu hấp thu	$1\,\hbar$	lượng tử
Sự va chạm nhỏ nhất khi ánh sáng phản xạ trên một tấm gương	$2\,\hbar$	lượng tử
Lượng ánh sáng nhỏ nhất mà ta có thể thấy được	*c.* $5\,\hbar$	lượng tử
Lượng ánh sáng nhỏ nhất mà một cánh hoa hấp thu	$1\,\hbar$	lượng tử
Làm đen phim ảnh	*c.* $3\,\hbar$	lượng tử
Đèn flash máy ảnh	*c.* $10^{17}\,\hbar$	cổ điển
Điện		
Electron bắn ra từ nguyên tử/phân tử	*c.* $1–2\,\hbar$	lượng tử
Electron phát ra từ kim loại	*c.* $1–2\,\hbar$	lượng tử
Electron chuyển động trong bộ vi xử lý	*c.* $2–6\,\hbar$	lượng tử
Tín hiệu truyền trong dây thần kinh, từ một phân tử đến phân tử kế bên	*c.* $5\,\hbar$	lượng tử
Dòng điện trong tia sét	*c.* $10^{38}\,\hbar$	cổ điển
Vật liệu		
Tách rời 2 nguyên tử sắt cạnh nhau	*c.* $1–2\,\hbar$	lượng tử
Bẻ gẫy một thanh thép	*c.* $10^{35}\,\hbar$	cổ điển
Quá trình cơ bản trong hiện tượng siêu dẫn	$1\,\hbar$	lượng tử
Quá trình cơ bản trong transistor	$1\,\hbar$	lượng tử
Quá trình từ hoá cơ bản	$1\,\hbar$	lượng tử
Hoá		
Va chạm nguyên tử trong chất lỏng ở nhiệt độ phòng	$1\,\hbar$	lượng tử
Dao động biến dạng của phân tử nước	*c.* $1-5\,\hbar$	lượng tử
Sự thay đổi hình dạng của phân tử, thí dụ như trong phản ứng hoá học	*c.* $1-5\,\hbar$	lượng tử
Phản ứng hoá học trong việc uốn cong một sợi tóc	*c.* $2-6\,\hbar$	lượng tử
Tách hai phân tử phô mai mozzarella	*c.* $300\,\hbar$	lượng tử
Ngửi thấy 1 phân tử	*c.* $10\,\hbar$	lượng tử
Nhiên liệu cháy trong xy lanh của một động cơ xe hơi trong thì nổ trung bình	*c.* $10^{37}\,\hbar$	cổ điển
Đời sống		
Phân tử không khí chạm vào màng nhĩ	*c.* $2\,\hbar$	lượng tử
Tín hiệu âm nhỏ nhất mà tai có thể nhận ra	Câu đố 9 ny	
Giai đoạn nhân đôi DNA trong sự phân bào	*c.* $100\,\hbar$	lượng tử
Sự thụ tinh cho một trứng	*c.* $10^{14}\,\hbar$	cổ điển
Bước ngắn nhất trong động cơ phân tử	*c.* $5\,\hbar$	lượng tử
Chuyển động của tinh trùng qua chiều dài một tế bào	*c.* $10^{15}\,\hbar$	cổ điển
Phân bào	*c.* $10^{19}\,\hbar$	cổ điển
Cái đập cánh của ruồi	*c.* $10^{24}\,\hbar$	cổ điển
Đi bộ qua quãng đường có chiều dài một thân người	*c.* $2 \cdot 10^{36}\,\hbar$	cổ điển
Hạt nhân và ngôi sao		
Phản ứng dung hợp hạt nhân trong ngôi sao	*c.* $1-5\,\hbar$	lượng tử
Bùng nổ tia gamma	*c.* $10^{80}\,\hbar$	cổ điển



HÌNH 6 Max Born (1882–1970)

đóng góp cho lĩnh vực này, gọi là *Cơ học lượng tử*.* Sau này thuật ngữ *Thuyết lượng tử* trở nên thông dụng hơn.

Thuyết lượng tử phát sinh từ sự hiện hữu của giá trị *nhỏ nhất* mà ta có thể đo được trong thiên nhiên là sự tổng quát hoá tư tưởng của Galilei đã có từ thế kỷ 17. Như ta đã bàn luận chi tiết trước kia, việc Galilei khẳng định về 'piccolissimi quanti' – lượng nhỏ nhất – của vật chất đã mang lại cho ông nhiều phiền toái. Chẳng mấy chốc ta sẽ khám phá ra rằng ý tưởng về độ biến đổi cực tiểu rất cần để mô tả chính xác và đúng, toàn thể vật chất và thiên nhiên. Do đó Born đã dùng thuật ngữ của Galilei cho một nhánh vật lý mới và gọi nó là 'Quantentheorie' hay 'Thuyết lượng tử'. Tiếng Anh sử dụng từ Latin số ít 'quantum' thay vì số nhiều như phần lớn các ngôn ngữ khác đã sử dụng.

Quyển I, trang 334

Cũng nên chú ý là từ 'quantum' *không* hàm ý rằng mọi giá trị đo được đều là *bội* của một lượng cực tiểu: điều này chỉ xảy ra trong một vài trường hợp.

Thuyết lượng tử là sự mô tả chuyển động vi mô. Ta *cần đến* Thuyết lượng tử khi quá trình tạo ra một tác dụng có bậc của độ lớn của lượng tử tác dụng. Bảng 2 cho thấy mọi quá trình có tầm cỡ nguyên tử hay phân tử, kể cả các quá trình sinh hoá đều là các quá trình lượng tử. Và các quá trình phát xạ và hấp thu ánh sáng cũng vậy. Những hiện tượng này *chỉ* có thể được mô tả bằng Thuyết lượng tử.

Bảng 2 cũng cho thấy thuật ngữ 'vi mô' có ý nghĩa khác nhau đối với một nhà vật lý và một nhà sinh học. Đối với nhà sinh học, một hệ là 'vi mô' nếu ta cần dùng kính hiển vi để quan sát nó. Đối với nhà vật lý, một hệ là *vi mô* nếu tác dụng đặc trưng của nó có bậc của độ lớn của lượng tử tác dụng. Nói cách khác, đối với một nhà vật lý một hệ

* Max Born (b. 1882 Breslau, d. 1970 Göttingen) đầu tiên nghiên cứu Toán học rồi mới chuyển sang Vật lý. Là giáo sư của đại học Göttingen, ông đã biến thành phố này thành một trung tâm vật lý của thế giới. Ông đã phát triển Cơ học lượng tử cùng với các cộng sự của mình là Werner Heisenberg và Pascual Jordan, rồi áp dụng nó vào hiện tượng tán xạ, Vật lý thể rắn, Quang học và chất lỏng. Ông là người đầu tiên hiểu rằng hàm sóng hay hàm trạng thái mô tả biên độ xác suất. Sau này Born và Emil Wolf viết các tác phẩm mà bây giờ vẫn còn là sách giáo khoa chính trong lĩnh vực quang học. Nhiều sách của Born đã trở thành kinh điển và được nhiều người trên thế giới tìm đọc.

Xem 6

Born đã thu hút nhiều tài năng rực rỡ nhất vào thời đó đến Göttingen như: Hund, Pauli, Nordheim, Oppenheimer, Goeppert-Mayer, Condon, Pauling, Fock, Frenkel, Tamm, Dirac, Mott, Klein, Heitler, London, von Neumann, Teller, Wigner, và hàng chục người khác. Vì là người Do Thái, Born mất việc vào năm 1933 khi cái ác đã ngự trị trong chính quyền Đức quốc. Ông di cư và trở thành giáo sư ở Edinburgh, nơi ông ở lại trong 20 năm. Sau mất mát này, Vật lý ở Göttingen không bao giờ hồi phục nổi. Nhờ công sức làm sáng tỏ ý nghĩa của hàm sóng ông đã nhận được giải Nobel vật lý năm 1954.



HÌNH 7 Werner Heisenberg (1901–1976)

thường là vi mô nếu nó *không thể* thấy được trong một kính hiển vi nhỏ. Để tăng thêm phần rối rắm, hiện nay các nhà Vật lý lượng tử gọi lớp học về hệ vi mô do họ phụ trách là 'mesoscopic', trong khi những người khác gọi hệ của họ là 'nanoscopic'. Cả hai thuật ngữ được đưa ra chỉ để thu hút sự chú ý và kinh phí: về mặt nhận thức thì nó vô ích.

Tác dụng của lượng tử tác dụng lên chuyển động

Có một cách khác để phân biệt sự khác nhau giữa một hệ vi mô hay lượng tử và một hệ vĩ mô cổ điển. Một tác dụng cực tiểu sẽ dẫn tới việc độ biến thiên tác dụng S của hai quan sát liên tiếp nhau của cùng một hệ trong thời gian Δt sẽ khác 0. Ta có

$$|S(t+\Delta t) - S(t)| = |(E \pm \Delta E)(t+\Delta t) - Et| = |E\Delta t \pm t\Delta E \pm \Delta E\Delta t| \geqslant \frac{\hbar}{2} . \qquad (1)$$

Hệ số 1/2 xuất hiện vì một tác dụng cực tiểu $\hbar$ sẽ tự động kéo theo một độ bất định bằng 1/2 giá trị của nó. Đến đây thì năng lượng E và thời gian t – nhưng không phải là (dương) ΔE hay Δt – có thể cho bằng 0 nếu ta chọn được quan sát viên thích hợp. Như vậy, sự hiện hữu của lượng tử tác dụng hàm ý rằng trong một hệ bất kỳ sự biến đổi bị ràng buộc bởi điều kiện

$$\Delta E \Delta t \geqslant \frac{\hbar}{2} , \qquad (2)$$

trong đó E là năng lượng của hệ và t là tuổi của nó, sao cho ΔE là độ biến thiên năng lượng và Δt là thời gian giữa hai quan sát liên tiếp.

Câu đố 10 e

Bằng lý luận tương tự, ta tìm được đối với một hệ bất kỳ vị trí và động lượng chịu điều kiện ràng buộc sau

$$\Delta x \Delta p \geqslant \frac{\hbar}{2} , \qquad (3)$$

trong đó Δx là độ bất định của vị trí và Δp là độ bất định của động lượng. Hai hệ thức nổi tiếng này được người khám phá ra nó, Werner Heisenberg, gọi là *hệ thức bất định*.*

* Người ta thường nói rằng hệ thức bất định năng lượng/thời gian có tầm quan trọng khác với hệ thức động lượng/vị trí. Đây là một tư tưởng sai lầm, lưu truyền qua nhiều thế hệ các nhà vật lý trước kia, tồn tại trên nhiều sách giáo khoa trong hơn 70 năm. Chỉ cần quên nó đi. Điều cốt yếu cần nhớ là tất cả 4 đại lượng xuất

Trong tiếng Anh chúng thường được gọi là 'uncertainty relations'; tuy vậy, thuật ngữ này không đúng. Các đại lượng này không phải là không chắc chắn mà là *không xác định*. Vì lượng tử tác dụng nên các biến động lực của hệ *không có* giá trị xác định. Không có cách tìm ra trị chính xác của động lượng, vị trí hay các biến động lực khác của một hệ lượng tử. Chúng ta sẽ luôn luôn sử dụng thuật ngữ 'hệ thức bất định'. Thói quen gọi hệ thức này là 'nguyên lý' thậm chí còn sai lầm hơn.

Một hệ có độ bất định vào cỡ $\hbar$ là một hệ lượng tử; nếu tích các độ bất định lớn hơn nhiều thì hệ là cổ điển và lúc đó việc mô tả hệ chỉ cần vật lý cổ điển cũng đủ. Vì vậy mặc dù vật lý cổ điển giả sử rằng *không có* độ bất định về số đo trong thiên nhiên, một hệ được coi là *cổ điển* chỉ khi độ bất định của nó *lớn* so với độ bất định khả hữu cực tiểu!

Nói cách khác, ta chỉ cần Thuyết lượng tử khi cố gắng đo một số đại lượng thật chính xác. Thật ra tự mỗi phép đo đã là một quá trình lượng tử. Và hệ thức bất định hàm ý rằng độ chính xác của phép đo bị giới hạn. Lượng tử tác dụng chứng tỏ rằng

Người ta không thể quan sát chuyển động với một độ chính xác vô hạn.

Nói cách khác, thế giới vi mô có tính *mờ*. Sự kiện này có nhiều hệ quả quan trọng và kỳ dị. Thí dụ, nếu người ta không thể quan sát chuyển động với độ chính xác vô hạn thì khái niệm chuyển động thực sự cần được xử lý hết sức cẩn trọng vì không thể áp dụng điều đó trong một số trường hợp nào đó. Theo một nghĩa nào đó, phần còn lại của cuộc hành trình của chúng ta chỉ là việc tìm hiểu các hệ quả của điều này.

Đúng ra trong chừng mực mà không-thời gian còn *phẳng* thì chúng ta vẫn còn *có thể* duy trì khái niệm chuyển động để mô tả các quan sát miễn là ta có chú ý đến các giới hạn suy ra từ nguyên lý lượng tử.

Những điều bất ngờ của lượng tử tác dụng

Lượng tử tác dụng $\hbar$ dẫn tới tính chất mờ của mọi chuyển động. Tính mờ này cũng kéo theo sự xuất hiện của các sai lệch trong một thời gian ngắn của các định luật bảo toàn năng lượng, động lượng và moment động lượng trong các hệ vi mô. Để bảo đảm tính tổng quát ta cũng cần nhấn mạnh rằng nếu thời gian quan sát dài – nói rõ hơn là dài hơn 1 microsecond – thì các định luật bảo toàn còn đúng. Nhưng trong phần đầu tiên của cuộc thám hiểm, ta đã nhận thấy rằng khi không có sự bảo toàn thì có các *điều bất ngờ* trong thiên nhiên xảy ra. Và đây là một số các điều như vậy.

Quyển I, trang 238

Vì không có chuyển động đều chính xác, hệ chỉ chuyển động trong không gian 1 chiều – như kim đồng hồ – luôn luôn có khả năng chuyển động ngược lại một chút, khiến cho

---

hiện trong các bất đẳng thức đều mô tả các tính chất *nội tại* của hệ. Đặc biệt, t là thời gian suy ra từ sự thay đổi quan sát được *bên trong* hệ chứ không phải là toạ độ thời gian đo bằng một đồng hồ bên ngoài; tương tự, vị trí x không phải là toạ độ không gian bên ngoài mà là vị trí đặc trưng cho hệ.

Xem 7

Werner Heisenberg (1901–1976) là một nhà vật lý lý thuyết quan trọng và là một người chơi bóng bàn và quần vợt xuất sắc. Trong năm 1925, khi còn trẻ, với sự giúp đỡ của Max Born và Pascual Jordan, ông đã phát triển phiên bản đầu tiên của Thuyết lượng tử; từ Thuyết lượng tử ông suy ra các hệ thức bất định. Nhờ các thành tựu này ông đã nhận được giải Nobel vật lý năm 1932. Ông cũng nghiên cứu về vật lý hạt nhân và hiện tượng cuộn xoáy. Trong đệ nhị thế chiến ông làm việc trong chương trình về sự phân hạch. Sau chiến tranh, ông xuất bản nhiều quyển sách giá trị về các vấn đề triết học trong vật lý, lần hồi trở thành một người lập dị và cố gắng nhưng không thành công – với sự giúp đỡ thiếu nhiệt tình của Wolfgang Pauli – để tìm ra sự mô tả thống nhất về thiên nhiên dựa trên Thuyết lượng tử, 'công thức thế giới'.

đồng hồ chỉ không chính xác. Thật vậy, Thuyết lượng tử tiên đoán rằng các đồng hồ có những giới hạn thuộc về bản chất:

▷ Không có đồng hồ hoàn hảo.

Hàm ý sâu xa của phát biểu này dần dần sẽ trở nên rõ ràng.

Cũng không thể tránh được việc vật hơi dịch chuyển sang một bên. Nói một cách chặt chẽ, Thuyết lượng tử còn suy ra rằng,

▷ Không có chuyển động đều cũng như không có chuyển động trong không gian 1 chiều.

Phát biểu này cũng che giấu nhiều điều bất ngờ khác.

Các giới hạn lượng tử cũng áp dụng cho các thước đo chiều dài. Ta không thể bảo đảm rằng thước hoàn toàn đứng yên đối với vật được đo chiều dài. Như vậy một mặt, lượng tử tác dụng hàm ý rằng không thể thực hiện các phép đo, mặt khác hàm ý rằng:

▷ Độ chính xác của phép đo bị giới hạn.

Một hệ quả khác của lượng tử tác dụng là một quan sát viên quán tính hay rơi tự do phải *lớn*, vì chỉ các hệ có kích thước lớn mới chuyển động gần đúng theo quán tính.

▷ Quan sát viên không thể là một hệ vi mô.

Nếu con người không có kích thước vĩ mô thì họ cũng không thể quan sát hay nghiên cứu về chuyển động.

Vì người ta chỉ có thể quan sát một chuyển động vi mô với độ chính xác hữu hạn, nên ta còn khám phá ra rằng

▷ Trong thế giới vi mô *chuyển động có thể nhanh hơn ánh sáng*.

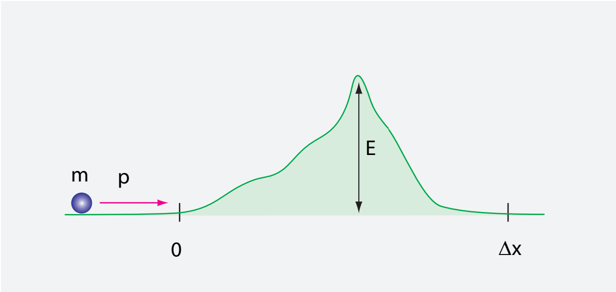
Như vậy Thuyết lượng tử tiên đoán có *tachyon*, ít nhất là trong thời gian ngắn. Với lý do tương tự,

▷ *Có thể có chuyển động ngược dòng thời gian trong thời gian và khoảng cách vi mô.*

Tóm lại, lượng tử tác dụng sẽ dẫn tới khả năng du hành trong thời gian vi mô. Tuy vậy, điều này không thể xảy ra trong thế giới vĩ mô, trong đời sống thông thường.

Nhưng còn nhiều điều nữa. Hãy tưởng tượng một chiếc xe đang chuyển động thì bỗng nhiên biến mất vĩnh viễn. Trong trường hợp này, động lượng cũng như năng lượng đều không bảo toàn. Tác dụng trong việc xe biến mất như vậy khá lớn so với $\hbar$, nên việc quan sát được hiện tượng như vậy cũng mâu thuẫn với chính vật lý cổ điển – và bạn có thể kiểm chứng điều này. Tuy vậy, lượng tử tác dụng cho phép một hạt *vi mô* như electron biến mất trong một thời gian *ngắn* miễn là sau đó nó xuất hiện trở lại.

Câu đố 11 s



HÌNH 8 Độ cao của các ngọn đồi không bao giờ đủ.

▷ Lượng tử tác dụng hàm ý rằng trong thiên nhiên không có sự trường cửu.

Nó cũng bao hàm ý:

▷ Chân không không phải là trống rỗng.

Nếu ta nhìn vào không gian rỗng hai lần, hai quan sát cách nhau một khoảng thời gian rất nhỏ, lần thứ hai ta sẽ thấy một chút năng lượng. Nếu thời gian đủ ngắn, lượng tử tác dụng sẽ dẫn tới việc quan sát thấy bức xạ hay các hạt vật chất. Thật vậy, các hạt có thể xuất hiện ở bất cứ nơi nào từ hư vô và biến mất ngay sau đó: giới hạn của tác dụng đòi hỏi như vậy. Tóm lại, thiên nhiên phô bày sự xuất hiện và sự biến mất trong một thời gian ngắn của vật chất và bức xạ. Nói cách khác, tư tưởng cổ điển về một chân không *trống rỗng* chỉ đúng khi chân không được quan sát trong một thời gian *dài*.

Lượng tử tác dụng hàm ý rằng các kim la bàn không hoạt động. Nếu ta nhìn một kim la bàn hai lần liên tiếp thật nhanh, hay ngay cả nhìn một ngôi nhà, ta thường thấy nó chỉ có một hướng như nhau. Nhưng vì tác dụng vật lý có cùng thứ nguyên với moment động lượng, một giá trị tác dụng cực tiểu dẫn tới một giá trị moment động lượng cực tiểu. Ngay cả một vật vĩ mô cũng có một giá trị cực tiểu đối với chuyển động quay của nó. Nói cách khác, Thuyết lượng tử tiên đoán

Câu đố 12 e

▷ Mọi vật đều quay.

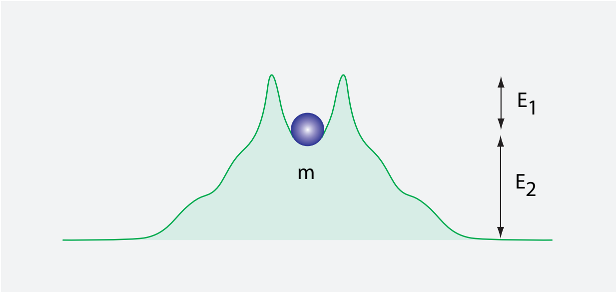
Một vật không quay chỉ là gần đúng khi các quan sát cách nhau một khoảng thời gian dài.

Đối với các hệ vi mô, giới hạn lượng tử trên chuyển động quay có những tác dụng đặc biệt. Nếu người ta có thể quan sát được góc quay – như đối với các phân tử – hệ hành xử như một vật vĩ mô: vị trí và sự định hướng của nó có tính mờ. Nhưng đối với một hệ mà ta không thể quan sát được góc quay, lượng tử tác dụng giới hạn moment động lượng là bội của $\hbar/2$. Đặc biệt, mọi hệ liên kết vi mô – như phân tử, nguyên tử, hay hạt nhân – đều chứa các chuyển động quay và các thành phần quay.

Sự biến đổi, đời sống và Democritus

Quyển I, trang 21

Khi khởi đầu cuộc phiêu lưu, ta đã nói đến việc người Hy Lạp phân biệt 3 loại thay đổi: vận chuyển, sinh trưởng và biến đổi. Ta cũng đã biết Democritus đã nhận thấy tất cả các



HÌNH 9 Hiện tượng vượt rào.

loại thay đổi này – bao gồm sinh và tử – thực ra đều giống nhau và đều do chuyển động của các nguyên tử. Lượng tử tác dụng sẽ làm cho điều này chính xác hơn.

Trước hết, tác dụng cực tiểu sẽ dẫn tới việc các chuồng và các bờ tường trong vườn bách thú đều không an toàn. Chuồng có đặc điểm là cần nhiều năng lượng để vượt qua. Về mặt vật lý, tường của chuồng là một ngọn đồi năng lượng, tương tự như trong Hình 8. Hãy tưởng tượng một hạt có động lượng p đến gần một bên đồi có độ rộng Δx.

Trong đời sống hằng ngày – và trong vật lý cổ điển cũng vậy – người ta không bao giờ thấy hạt ở bên kia đồi nếu động năng của nó $p^2/2m$ *nhỏ hơn* chiều cao E của đồi. Nhưng ta hãy tưởng tượng phần động lượng còn thiếu để vượt qua đồi $\Delta p = \sqrt{2mE} - p$, thoả hệ thức $\Delta x \Delta p \leqslant \hbar/2$. Hạt sẽ có khả năng vượt qua đồi dù không đủ năng lượng . Lượng tử tác dụng cho ta thấy một ngọn đồi có bề rộng

$$\Delta x \leqslant \frac{\hbar/2}{\sqrt{2mE} - p} \tag{4}$$

không phải là một vật cản đối với một hạt có khối lượng m. Nhưng đây chưa phải là tất cả. Vì động lượng của hạt p không xác định, một hạt có thể vượt qua đồi ngay cả khi đồi *rộng hơn* giá trị (4) – mặc dù đồi càng rộng thì xác suất vượt qua càng nhỏ. Như vậy một hạt có thể vượt qua *bất kỳ* một vật cản nào. Hiện tượng này được gọi là *hiệu ứng xuyên hầm*. Về mặt cổ điển hiệu ứng này không thể xảy ra. Trong Thuyết lượng tử, điều kỳ diệu này có thể xảy ra vì hàm sóng khác 0 tại vị trí của ngọn đồi; hay cũng có thể nói là hàm sóng khác 0 bên trong ngọn đồi. Như vậy nó cũng sẽ khác 0 sau ngọn đồi. Kết quả là ta có thể xuyên qua các hệ lượng tử hay đào 'hầm' xuyên qua đồi.

Trang 90

Tóm lại, nguyên lý tác dụng cực tiểu hàm ý rằng không có những hộp kín mít trong thiên nhiên. Nhờ hiệu ứng xuyên hầm,

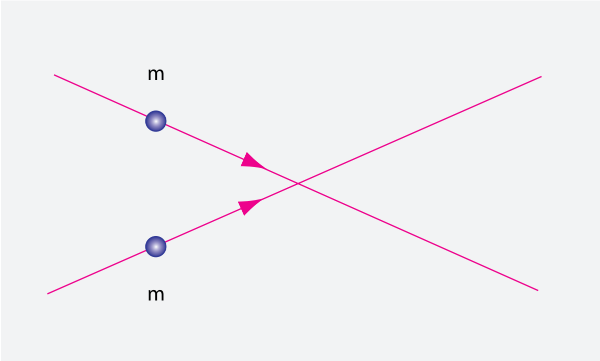
▷ Vật chất có thể bị xuyên qua.

Tính xuyên thấu được của vật chất tương phản với các quan sát cổ điển thông thường. Bạn có thể giải thích lý do chuồng sư tử lại dùng được *mặc dù* nguyên lý tác dụng cực tiểu vẫn đúng không?

Câu đố 13 s

Ngoài ra, lượng tử tác dụng cũng dẫn tới việc một hạt có động năng lớn hơn chiều cao năng lượng của đồi vẫn có thể bị *phản xạ* tại ngọn đồi. Hiện tượng này cũng không thể xảy ra trong vật lý cổ điển.

Nguyên lý tác dụng cực tiểu cũng dẫn tới việc các kệ sách không an toàn. Tại sao?



HÌNH 10 Những vật giống nhau có quỹ đạo cắt nhau.

Kệ là vật ngăn chuyển động. Một quyển sách cũng giống như một vật trong Hình 9: vật được ngọn đồi năng lượng bao quanh ngăn nó thoát ra bên ngoài thế giới có năng lượng thấp hơn. Nhưng nhờ hiệu ứng xuyên hầm, vật luôn luôn có thể thoát ra. Hình này cũng có thể áp dụng cho một cành cây, một cái đinh trên tường hay một vật bất kỳ gắn vào một vật khác. Vật thể không bao giờ có thể gắn liền với nhau mãi mãi. Đặc biệt, ta sẽ khám phá ra rằng mỗi thí dụ về sự phát xạ ánh sáng – kể cả hiện tượng phóng xạ – đều là kết quả của hiệu ứng này.

Tóm lại, lượng tử tác dụng dẫn đến kết luận

▷ Phân rã là một phần của thiên nhiên.

Ta cũng nên nhớ rằng phân rã thường xuất hiện trong đời sống hằng ngày dưới một cái tên khác: *sự phá vỡ*. Đúng ra mọi đổ vỡ đều cần đến lượng tử tác dụng để mô tả nó. Điều hiển nhiên là sự phá vỡ thường có nguyên nhân cổ điển nhưng *cơ chế* của nó lại có tính lượng tử. Chỉ có thể phá vỡ những vật tuân theo Thuyết lượng tử. Tóm lại, không có những hệ ở trạng thái kích thích bền vững trong thiên nhiên. Ngoài ra, ta cũng không có ký ức hoàn hảo với cùng một lý do như vậy. (Bạn có thể chứng minh điều này không?)

Xem 8

Câu đố 14 s

Nhìn tổng quát, *sự già nua* và *cái chết* cũng là kết quả của lượng tử tác dụng. Lão cũng như tử, đều là sự tổng hợp của các quá trình phá vỡ. Khi qua đời, các kết cấu trong một sinh vật bị phá vỡ. Phá vỡ là một dạng phân rã bắt nguồn từ hiệu ứng xuyên hầm. Như vậy tử là một quá trình lượng tử. Về mặt cổ điển không có cái chết. Có lẽ đây là lý do tại sao có rất nhiều người tin vào sự bất tử hay tuổi thanh xuân vĩnh cửu?

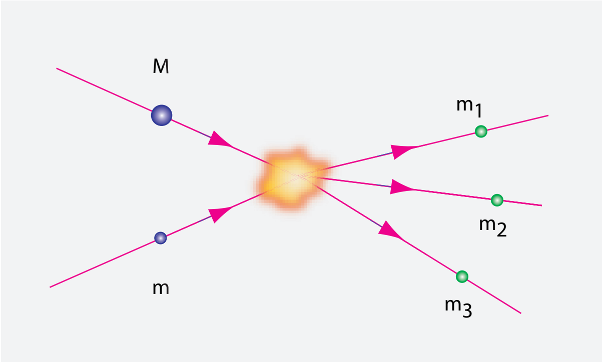
Câu đố 15 s

Ta sẽ khám phá ra rằng lượng tử tác dụng cũng là lý do giải thích cho tầm quan trọng của biến động lực tác dụng trong vật lý cổ điển. Thật ra tác dụng *cực tiểu* là nguồn gốc của nguyên lý tác dụng *cực tiểu* trong vật lý cổ điển.

Tác dụng cực tiểu cũng hàm ý vật chất không thể liên tục mà phải được cấu thành từ các thực thể nhỏ nhất. Thật vậy, một luồng vật chất thực sự liên tục sẽ mâu thuẫn với Nguyên lý lượng tử. Bạn có thể cung cấp một luận cứ chính xác không? Dĩ nhiên vào lúc này, trong cuộc thám hiểm của chúng ta, tính không liên tục của vật chất không còn là điều ngạc nhiên nữa. Nhưng lượng tử tác dụng cũng hàm ý là *bức xạ* cũng không thể liên tục. Như Albert Einstein là người đầu tiên đã phát biểu một cách tường minh, ánh sáng được các hạt lượng tử tạo thành.

Câu đố 16 s

Tổng quát hơn, lượng tử tác dụng dẫn tới kết quả là trong thiên nhiên



HÌNH 11 Sự biến đổi thông qua các phản ứng.

▷ Các hạt vi mô tạo nên mọi dòng và sóng.

Thuật ngữ 'vi mô' (hay 'lượng tử') là điểm cốt yếu, vì các hạt như vậy sẽ *không* hành xử giống như các viên đá nhỏ. Ta đã gặp nhiều điều dị biệt và sẽ còn gặp nhiều điều dị biệt khác. Vì lý do này, có lẽ nên có một cái tên đặc biệt dành cho các hạt vi mô; nhưng cho đến nay mọi đề nghị trong đó có tên *quanton* là phổ biến nhất đều không được chấp nhận.

Lượng tử tác dụng có nhiều hệ quả kỳ dị đối với các hạt vi mô. Lấy 2 hạt có cùng khối lượng và cấu tạo. Ta hãy tưởng tượng rằng quỹ đạo của chúng cắt nhau và tại chỗ cắt nhau chúng tiến đến sát nhau như trong Hình 10. Tác dụng cực tiểu dẫn tới kết quả là trong tình huống như vậy, nếu khoảng cách đủ nhỏ, hai hạt có thể đổi vai trò cho nhau mà không ai có thể ngăn cản hay nhận ra điều đó. Như vậy trong một khối khí ta *không thể* – do lượng tử tác dụng – theo dõi chuyển động của các hạt và phân biệt các hạt này với nhau. Bạn có thể chứng minh kết luận này và chỉ rõ các điều kiện bằng cách sử dụng hệ thức bất định hay không? Tóm lại

Câu đố 17 s

▷ Trong thiên nhiên ta không thể phân biệt các hạt giống nhau.

Câu đố 18 s

Bạn có thể đoán được điều gì sẽ xảy ra trong trường hợp ánh sáng hay không?

Nhưng vật chất vẫn còn có điều đáng chú ý hơn. Ta hãy tưởng tượng có 2 hạt – có thể khác nhau – tiến đến gần nhau như trong Hình 11. Ta đã biết rằng nếu khoảng cách rất nhỏ vật chất trở nên mờ. Đến đây nguyên lý tác dụng cực tiểu làm cho nhiều điều có thể xảy trong phạm vi nhỏ bé đó miễn là sản phẩm sinh ra có cùng động lượng, moment động lượng và năng lượng toàn phần như các vật ban đầu. Thật vậy, việc loại bỏ các quá trình như vậy sẽ dẫn tới kết quả là người ta có thể quan sát thấy các tác dụng nhỏ bất kỳ và như vậy khử luôn tính mờ của thiên nhiên. Bạn có thể tự kiểm tra điều này. Tóm lại,

▷ Lượng tử tác dụng cho phép vật chất biến đổi.

Người ta cũng nói rằng lượng tử tác dụng cho phép *các phản ứng* xảy ra giữa các hạt. Ta sẽ khám phá ra rằng, *mọi* loại phản ứng trong thiên nhiên, bao gồm sự hô hấp, sự tiêu hoá, phản ứng hoá học và hạt nhân đều bắt nguồn từ sự có mặt của lượng tử tác dụng.

Một loại quá trình đặc biệt đáng yêu đối với chúng ta là *sự sinh trưởng*. Lượng tử tác

dụng hàm ý rằng mọi quá trình sinh trưởng đều xảy ra từng bước nhỏ. Thật vậy,

▷ Mọi quá trình sinh trưởng trong thiên nhiên đều là các quá trình lượng tử.

Điều chủ yếu là lượng tử tác dụng giải thích cho đời sống. Chỉ nhờ có lượng tử tác dụng mới có sự sinh sản và sự di truyền. Sự sinh sản, hoạt động tình dục và cái chết là các hệ quả của lượng tử tác dụng.

Vì vậy Democritus vừa đúng lại vừa sai. Ông đã đúng khi tìm ra các thành phần cơ bản của vật chất và bức xạ, khi thống nhất mọi thay đổi trong thiên nhiên – từ sự vận chuyển tới sự biến đổi và sự sinh trưởng – xem như sự chuyển động của các hạt. Nhưng ông sai khi giả sử rằng các hạt vi mô hành xử như các viên đá nhỏ. Như chúng ta sẽ chứng tỏ sau đây, các hạt nhỏ nhất hành xử giống như các *quanton*: ngẫu nhiên, một phần giống như sóng, một phần giống như hạt.

Sự ngẫu nhiên – một hệ quả của lượng tử tác dụng

Điều gì sẽ xảy ra nếu ta cố gắng đo một độ biến đổi nhỏ hơn lượng tử tác dụng? Thiên nhiên có một câu trả lời đơn giản: ta sẽ kiếm được *những kết quả ngẫu nhiên*. Nếu ta xây dựng một thí nghiệm để cố tạo ra một độ biến đổi hay một tác dụng bằng 1/4 lượng tử tác dụng thì thí nghiệm sẽ tạo ra, thí dụ như biến đổi *một* lượng tử tác dụng trong 1/4 trường hợp và *không có* sự thay đổi trong 3/4 trường hợp,* như vậy kết quả là *trung bình* của 1/4 $\hbar$.

▷ Mọi nỗ lực đo các tác dụng nhỏ hơn $\hbar$ đều cho các kết quả ngẫu nhiên.

Nếu bạn muốn cô đọng Vật lý lượng tử trong một phát biểu chính yếu thì trên đây là điều bạn cần.

Lượng tử tác dụng dẫn tới sự ngẫu nhiên ở mức độ vi mô. Người ta cũng có thể thấy mối liên kết này theo cách sau đây. Do hệ thức bất định, ta không thể kiếm được giá trị xác định cho cả động lượng lẫn vị trí của một hạt. Điều hiển nhiên là, ta cũng không thể kiếm được các giá trị xác định trong các thí nghiệm riêng lẻ của một bộ thí nghiệm hay của một quan sát viên. Do đó, các điều kiện ban đầu – cho một hệ lẫn một bộ thí nghiệm – không thể được sao chép một cách chính xác. Như vậy lượng tử tác dụng cho kết quả là khi ta thực hiện một thí nghiệm trên một hệ vi mô hai lần, kết quả (thường) khác nhau. Kết quả chỉ có thể giống nhau nếu cả hệ lẫn quan sát viên đều có cấu hình giống hệt nhau trong mỗi lần. Tuy vậy, do Nguyên lý 2 của nhiệt động lực học và do lượng tử tác dụng, ta không thực hiện được việc tái tạo một cấu hình. Do đó,

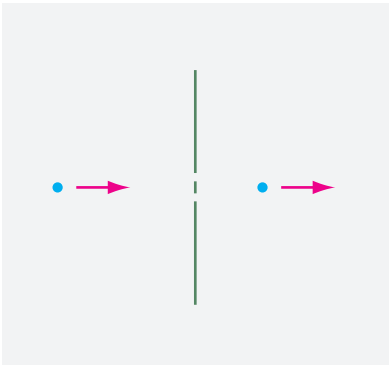
▷ Các hệ vi mô hành xử một cách ngẫu nhiên.

Hiển nhiên là sẽ có một số kết quả *trung bình*; nhưng trong mọi trường hợp, các quan sát vi mô *có tính xác suất*. Nhiều người không nuốt trôi được kết luận này của Thuyết lượng tử. Nhưng sự thật là: lượng tử tác dụng khiến cho hành trạng của các hệ lượng tử khác hẳn các hệ cổ điển. Không thể tránh khỏi kết luận này:

* Trong ngữ cảnh này, 'không thay đổi' có nghĩa là 'không có độ biến thiên' của biến vật lý được đo; nói một cách tổng quát, luôn luôn có sự thay đổi nhưng không nhất thiết phải là sự thay đổi của biến được đo.



HÌNH 12 Một hiệu ứng lượng tử nổi tiếng: làm cách nào cửa sổ của toa tàu điều khiển được việc hiển thị hai hình chồng chập? (Photo © Greta Mansour)



HÌNH 13 Một hạt và một màn có hai khe gần nhau.

▷ Thiên nhiên hành xử một cách ngẫu nhiên.

Ta có thể thấy sự ngẫu nhiên trong đời sống hằng ngày không? Có đấy. Mọi *cửa sổ* đều chứng tỏ rằng thiên nhiên hành xử một cách ngẫu nhiên ở tầm mức vi mô. Mọi người đều biết rằng chúng ta có thể sử dụng một cửa sổ của toa tàu để quan sát phong cảnh *bên ngoài* hay tập trung nhìn ảnh phản chiếu trên cửa sổ của một người *bên trong* toa tàu. Nói cách khác, sự quan sát như trong Hình 12 chứng tỏ rằng thuỷ tinh phản chiếu một số hạt ánh sáng và để cho một số hạt khác đi qua. Chính xác hơn, thuỷ tinh phản chiếu một số hạt ánh sáng chọn lọc một cách ngẫu nhiên; tuy vậy tỷ lệ trung bình thì không đổi. Trong các tính chất này, sự phản xạ một phần tương tự như hiệu ứng xuyên hầm. Thật vậy, sự phản xạ một phần của photon trong thuỷ tinh là kết quả của lượng tử tác dụng. Trường hợp này cũng có thể *được mô tả* bằng vật lý cổ điển nhưng ta không thể *giải thích* số lượng photon phản xạ nếu không sử dụng Thuyết lượng tử. Ta vẫn có:

▷ Quanton chuyển động một cách ngẫu nhiên.

Không có lượng tử tác dụng, những cuộc hành trình trên tàu lửa sẽ chán hơn rất nhiều.

Sóng – Một hệ quả của lượng tử tác dụng

Lượng tử tác dụng dẫn đến một kết quả quan trọng về *quỹ đạo* của các hạt. Nếu một hạt du hành từ điểm này sang điểm khác, không thể nào biết hạt đã chọn con đường nào giữa hai con đường. Thật vậy, để phân biệt giữa hai quỹ đạo khả hữu nhưng chỉ khác nhau một chút, người ta sẽ phải đo thật đúng những tác dụng nhỏ hơn $\hbar$. Đặc biệt nếu một hạt đi xuyên qua một màn có hai khe gần nhau như được minh hoạ trong Hình 13, thì ta không thể nói rõ là hạt đi qua khe nào. Tính bất khả này là điều cơ bản.

Ta đã biết đến hiện tượng chuyển động mà ta không thể nói chính xác được cách vật chuyển động hay quỹ đạo của vật sau khi đi ra sau màn: đây là cách hành xử của *chuyển động sóng*. Mọi sóng đều chịu tác động của hệ thức bất định

Quyển I, trang 313

$$\Delta\omega\Delta t \geqslant \frac{1}{2} \quad \text{và} \quad \Delta k \Delta x \geqslant \frac{1}{2} \,. \tag{5}$$

Sóng là một kiểu chuyển động được mô tả bằng một *phase* thay đổi theo không gian và thời gian. Hoá ra điều này đúng đối với mọi chuyển động và đặc biệt đúng đối với vật chất.

Ta đã thấy các hệ lượng tử chịu tác động của các hệ thức

$$\Delta E \Delta t \geqslant \frac{\hbar}{2} \quad \text{và} \quad \Delta p \Delta x \geqslant \frac{\hbar}{2} \,. \tag{6}$$

Như vậy ta phải gán cho hệ lượng tử một tần số và một bước sóng:

$$E = \hbar\omega \quad \text{và} \quad p = \hbar k = \hbar \frac{2\pi}{\lambda} \,. \tag{7}$$

Hệ thức giữa năng lượng và tần số đối với *ánh sáng* và hệ thức giữa động lượng và bước sóng tương đương đã được Max Planck tìm ra năm 1899. Trong những năm từ 1905 trở đi, Albert Einstein chứng minh rằng các hệ thức đó đúng với mọi trường hợp phát xạ và hấp thu ánh sáng. Năm 1923 và 1924, Louis de Broglie* tiên đoán rằng hệ thức đó cũng đúng với mọi hạt *vật chất* lượng tử. Sau đó vài năm người ta có được các bằng chứng thực nghiệm. (Đây là một thí dụ về một khám phá được thực hiện sau gần 20 năm chậm trễ.) Tóm lại, lượng tử tác dụng đưa đến kết luận:

Trang 77

▷ Các hạt vật chất cũng hành xử như sóng.

Đặc biệt, lượng tử tác dụng dẫn đến kết quả là có *hiện tượng giao thoa* của các dòng hạt.

* Louis de Broglie (b. 1892 Dieppe, d. 1987 Paris), vật lý gia và giáo sư ở Sorbonne. Hệ thức năng lượng – tần số đối với ánh sáng đã đem lại giải Nobel vật lý năm 1918 và 1921 cho Max Planck và Albert Einstein. De Broglie đã mở rộng hệ thức để tiên đoán bản chất sóng của electron (và của tất cả các hạt vật chất lượng tử khác): đây là điểm cốt yếu trong luận án tiến sĩ của ông. Tiên đoán này đã được khẳng định bằng thực nghiệm lần đầu tiên sau đó vài năm, 1927. Nhờ tiên đoán về bản chất sóng của vật chất, de Broglie đã nhận giải Nobel vật lý năm 1929. Là một người quý tộc, sau đó ông không nghiên cứu gì thêm. Thí dụ như Schrödinger là người đã thiết lập phương trình sóng, mặc dù de Broglie cũng có thể làm được điều đó.

Hạt – một hệ quả của lượng tử tác dụng

Quyển I, trang 353

Lượng tử tác dụng, độ biến đổi nhỏ nhất, dẫn đến kết quả các dòng chảy không thể quá yếu. Điều này áp dụng cho *mọi* dòng chảy: đặc biệt, nó áp dụng cho sông ngòi, dòng chất rắn, luồng khí, chùm ánh sáng, dòng năng lượng, dòng entropy, dòng động lượng, dòng moment động lượng, dòng xác suất, mọi loại tín hiệu, dòng điện tích, dòng sắc tích và dòng nhược tích.

Dòng nước trong các con sông giống như các dòng vật chất khác, không thể nhỏ tuỳ ý: lượng tử tác dụng quy định là có một dòng vật chất nhỏ nhất trong thiên nhiên. Tuỳ theo trường hợp, dòng vật chất nhỏ nhất là phân tử, nguyên tử hay một hạt nhỏ hơn. Thật vậy, lượng tử tác dụng cũng là nguồn gốc của việc quan sát thấy điện tích nhỏ nhất trong dòng điện. Vì mọi vật chất đều có thể chảy, lượng tử tác dụng cho ta kết luận:

▷ Mọi vật chất đều có tính chất hạt.

Tương tự như vậy, lượng tử tác dụng cũng cho kết luận rằng ánh sáng không thể quá yếu. Có một độ rọi nhỏ nhất trong thiên nhiên; nó được gọi là *photon* hay *lượng tử ánh sáng*. Vì ánh sáng là một sóng nên ta có thể sử dụng lập luận này cho mọi loại sóng khác. Tóm lại, lượng tử tác dụng dẫn đến kết luận:

▷ Mọi sóng đều có tính chất hạt.

Điều này đã được chứng minh cho sóng ánh sáng, sóng nước, tia X, sóng âm, sóng plasma, xoáy chất lỏng và các loại sóng bất kỳ khác mà người ta đã quan sát thấy. (Sau cùng, năm 2016 người ta đã ghi nhận được sóng hấp dẫn; người ta cũng mong đợi sự hiện hữu của *graviton*, hạt của sóng hấp dẫn, mặc dù việc này có thể cần một thời gian dài để chứng minh bằng thực nghiệm.)

Tóm lại, lượng tử tác dụng phát biểu rằng:

▷ Nếu một vật chuyển động nó phải được cấu thành từ các hạt lượng tử hay quanton.

Từ đây trở đi ta sẽ tìm hiểu và phân biệt một cách chính xác sự khác nhau giữa một hạt lượng tử và một viên đá nhỏ hay một hạt cát. Ta sẽ khám phá ra rằng các quanton vật chất chuyển động khác nhau, hành xử khác nhau khi quay và khi trao đổi.

Thông tin lượng tử

Trong Khoa học máy tính, đơn vị biến đổi nhỏ nhất được gọi là 'bit'. Sự hiện hữu của độ biến đổi nhỏ nhất trong thiên nhiên khiến cho Khoa học máy tính – hay Khoa học thông tin – có thể được sử dụng để mô tả thiên nhiên, đặc biệt trong Thuyết lượng tử. Sự tương tự này đã thu hút nhiều công trình nghiên cứu trong nhiều thập kỷ qua và người ta đã gặp nhiều câu hỏi thú vị: Có thể có bộ lưu trữ thông tin vô hạn không? Có thể đọc và sao chép đầy đủ các thông tin không? Có thể truyền tin một cách bí mật được không? Có thể truyền và lưu trữ thông tin mà không bị nhiễu không? Có thể sử dụng Vật lý lượng tử để tạo ra các loại máy tính mới không? Cho đến nay, câu trả lời của tất cả các câu hỏi này là phủ định; nhưng niềm hy vọng làm thay đổi tình thế này vẫn chưa mất.

Sự tương tự giữa Thuyết lượng tử và Khoa học thông tin có giới hạn: Khoa học thông tin chỉ có thể mô tả 'phần mềm' của thiết bị. Đối với các nhà vật lý, 'phần cứng' của thiên nhiên là phần chủ yếu. Phần cứng của thiên nhiên đi vào phần mô tả khi ta cần đến giá trị thực sự $\hbar$ của lượng tử tác dụng.

Khi ta tìm hiểu sự tương đồng và sự dị biệt giữa thiên nhiên và Khoa học thông tin, ta sẽ khám phá ra rằng lượng tử tác dụng bao hàm ý tưởng là không thể sao chép hệ vật lý vĩ mô – hay 'được nhân bản', như lý thuyết gia lượng tử đã phán. Thiên nhiên không cho phép sao chép các vật vĩ mô. Nói cách khác:

▷ Không có máy sao chép hoàn hảo.

Lượng tử tác dụng sẽ khiến cho ta không thể thu thập và sử dụng thông tin để sản xuất ra một bản sao hoàn hảo.

Việc tìm hiểu về máy sao chép sẽ nhắc cho ta nhớ về thứ tự chính xác mà các phép đo được thực hiện trong các thí nghiệm. Khi thứ tự đo có thể đảo ngược mà không ảnh hưởng đến kết quả, các nhà vật lý gọi đó là 'sự giao hoán'. Lượng tử tác dụng cho ta kết luận:

▷ Các biến động lực của vật lý không giao hoán.

Ta cũng sẽ thấy rằng lượng tử tác dụng hàm ý rằng các hệ không luôn luôn độc lập mà có thể *liên đới* với nhau. Thuật ngữ này do Erwin Schrödinger đưa ra, mô tả một trong những hệ quả phi lý nhất của Thuyết lượng tử. Sự liên đới khiến cho mọi vật trong thiên nhiên kết nối với các vật khác. Sự liên đới sinh ra các hiệu ứng *hình như* (nhưng không) nhanh hơn ánh sáng.

Trang 153

▷ Sự liên đới sinh ra một dạng phi định xứ (giả hiệu).

Xem 9

Sự liên đới đưa tới kết luận không thể có sự truyền thông đáng tin cậy.

Ta cũng sẽ khám phá ra rằng *sự mất điều hợp* là một quá trình đầy dẫy trong thiên nhiên ảnh hưởng đến mọi hệ lượng tử. Một mặt nó cho phép các phép đo nhưng mặt khác nó không cho phép tạo ra các máy tính lượng tử.

Trang 158

Các câu đố vui và lạ về lượng tử tác dụng

Mặc dù ta đã công nhận rằng cho tới nay ta không thể thực hiện được một thí nghiệm mâu thuẫn với tác dụng cực tiểu nhưng ta vẫn phải kiểm tra rằng tác dụng cực tiểu không mâu thuẫn với lý trí. Đặc biệt, tác dụng cực tiểu cũng phải nhất quán với mọi thí nghiệm *tưởng tượng*. Điều này không phải là hiển nhiên.

* *

Câu đố 19 s

Phạm vi lượng tử trong con lắc đồng hồ nằm ở đâu?

* *

Khi trường điện từ nhập cuộc, giá trị của tác dụng (thường) phụ thuộc vào sự lựa chọn thế vector và như vậy phụ thuộc vào sự lựa chọn chuẩn. Ta đã thấy trong phần Điện

động lực học với một chọn lựa chuẩn thích hợp ta có thể làm thay đổi giá trị của tác dụng bằng cách cộng hay trừ một lượng tuỳ ý. Tuy vậy, có một tác dụng nhỏ nhất trong thiên nhiên. Điều này có thể xảy ra vì trong Thuyết lượng tử, không thể thay đổi chuẩn vật lý bằng cách cộng hay trừ một lượng bất kỳ mà chỉ có thể bằng cách *nhân đôi* giá trị cực tiểu. Như vậy chúng không cho phép ta có giá trị nhỏ hơn tác dụng cực tiểu.

Quyển III, trang 86

* *

Cây trưởng thành ngừng tăng trưởng trong bóng tối. Không có ánh sáng, các phản ứng cần cho sự sinh trưởng ngừng lại. Bạn có thể chứng tỏ đây là một hiệu ứng lượng tử và không thể giải thích bằng vật lý cổ điển được không?

Câu đố 20 s

* *

Phần lớn các quá trình lượng tử trong đời sống thông thường là các quá trình điện từ. Bạn có thể chứng tỏ rằng lượng tử tác dụng cũng có thể áp dụng cho các quá trình hạt nhân, tức là cho các quá trình không phải là quá trình điện từ không?

Câu đố 21 s

* *

Lượng tử tác dụng có độc lập với quan sát viên, ngay cả khi gần đạt tới tốc độ ánh sáng hay không? Câu hỏi này là nguyên do khiến Planck tiếp xúc với chàng trai Einstein, mời anh ta đến Berlin và giới thiệu anh ta với cộng đồng vật lý quốc tế.

Câu đố 22 s

* *

Lượng tử tác dụng hàm ý rằng một người tí hon, như *Tom Thumb* không thể hiện hữu, không thể có các đường fractal trong thiên nhiên và '*định luật Moore*' về điện tử của chất bán dẫn, đã phát biểu rằng số transistor trên một vi mạch tăng lên gấp đôi mỗi 2 năm, không thể đúng mãi mãi. Tại sao không?

Câu đố 23 s

* *

Hãy lấy một cái móng ngựa. Khoảng cách giữa 2 đầu sẽ không cố định, vì nếu không, ta sẽ đồng thời biết được vị trí và vận tốc của chúng, mâu thuẫn với hệ thức bất định. Dĩ nhiên lập luận vẫn còn giá trị đối với vật rắn bất kỳ khác. Tóm lại, cả Cơ học lượng tử lẫn Thuyết tương đối đặc biệt đều chứng tỏ rằng không có vật rắn, mặc dù còn những lý do khác.

* *

Moment động lượng có cùng thứ nguyên như tác dụng. Tác dụng nhỏ nhất dẫn tới việc có một moment động lượng nhỏ nhất trong thiên nhiên. Làm thế nào có được điều này nếu hạt đã cho có spin bằng zero, tức là không có moment động lượng?

Câu đố 24 s

* *

Ta có thể bắt đầu một cuộc bàn luận về Thuyết lượng tử bằng cách phát biểu rằng có một moment động lượng cực tiểu thay vì tác dụng cực tiểu hay không?

Câu đố 25 s

* *

Niels Bohr, ngoài việc truyền bá tư tưởng về tác dụng cực tiểu còn là một người ủng hộ nhiệt tình cho *nguyên lý bổ sung*. Đây là một ý tưởng cho rằng các cặp biến động lực nào

đó của hệ – như vị trí và động lượng – có *độ chính xác* gắn kết với nhau: nếu một cặp được biết với độ chính xác cao thì cặp khác cần được biết với độ chính xác thấp. Bạn có thể suy ra nguyên lý này từ tác dụng cực tiểu không?

Câu đố 26 s

Mối hiểm nguy của việc mua một hộp đậu

Một cách khác để cho ta thấy các hệ quả vô lý của Thuyết lượng tử, được cho bởi các cảnh báo quá lố về sản phẩm, mà theo một số luật sư tài ba nào đó thì nên in nó lên mỗi hộp đậu và lên mỗi túi sản phẩm. Nó cho ta thấy rõ nhân thế đã lừa gạt chúng ta như thế nào.

Xem 10

Cảnh báo: nên thận trọng khi **nhìn** sản phẩm này:

- Nó phát ra bức xạ nhiệt.
- Ánh sáng chói chang có tác dụng nén mạnh lên sản phẩm này.

Cảnh báo: nên thận trọng khi **chạm vào** sản phẩm này:

- Một phần của nó có thể nóng lên trong khi phần khác có thể lạnh đi và sẽ gây ra hoả hoạn.

Cảnh báo: nên thận trọng khi **vận chuyển** sản phẩm này:

- Nó bao gồm ít nhất 99.999 999 999 999 % khoảng không.
- Sản phẩm này chứa các hạt chuyển động với tốc độ lớn hơn 1 triệu km/h.
- Mỗi kilogram sản phẩm này chứa năng lượng của 1000 trái bom hạt nhân.*
- Trong trường hợp sản phẩm này tiếp xúc với phản vật chất, một vụ nổ thảm khốc sẽ xảy ra.
- Trong trường hợp sản phẩm này quay tròn, nó sẽ phát ra sóng hấp dẫn.

Cảnh báo: nên thận trọng khi **vận chuyển** sản phẩm này:

- Lực cần thiết phụ thuộc vào vận tốc cũng như trọng lượng của nó.
- Sản phẩm này sẽ phát ra các bức xạ phụ khi bị gia tốc.
- Sản phẩm này hút mọi vật chung quanh nó, kể cả con của người mua hàng, với một lực tăng lên khi khoảng cách giảm đi.

Cảnh báo: nên thận trọng khi **lưu trữ** sản phẩm này:

- Việc giữ sản phẩm này ở một nơi riêng biệt và để cho nó đứng yên không thể xảy ra cùng một lúc.
- Trừ trường hợp được lưu trữ dưới mặt đất sâu nhiều km, theo thời gian các tia vũ trụ sẽ biến sản phẩm này thành chất phóng xạ.
- Sản phẩm này có thể phân huỷ trong 10^{35} năm kế tiếp.

* Một đầu đạn nguyên tử tiêu chuẩn có sức công phá khoảng 0.2 megaton (chất nổ ở đây được xem là trinitrotoluene hay TNT), hay khoảng 30 trái bom thả xuống Hiroshima, là 15 kiloton. Một megaton được định nghĩa là 1 Pcal=4.2 PJ, mặc dù TNT toả ra năng lượng ít hơn giá trị này khoảng 5 %. Nói cách khác, 1 megaton là năng lượng của gần 47 g vật chất. Số lượng đó ít hơn một nắm của chất rắn hay chất lỏng thường gặp.

Xem 11

- Nó có thể lạnh đi và tự bay vào không trung.
- Sản phẩm này làm hỏng không thời gian trong vùng phụ cận với nó bao gồm thùng chứa.
- Dù được chứa trong một thùng kín, sản phẩm này sẽ bị ảnh hưởng và ảnh hưởng lên mọi vật khác trong vũ trụ, bao gồm cha mẹ vợ của bạn.
- Sản phẩm này có thể biến mất tại nơi nó đang hiện diện và tái xuất hiện tại một nơi ngẫu nhiên trong vũ trụ kể cả garage nhà hàng xóm.

Cảnh báo: nên thận trọng khi **du lịch** xa sản phẩm này:

- Nó sẽ hết hạn trước khi người mua sử dụng.

Cảnh báo: nên thận trọng khi **sử dụng** sản phẩm này:

- Việc sử dụng bất kỳ cái gì cũng đều làm cho entropy của vũ trụ gia tăng.
- Thành phần của sản phẩm này giống hệt các thành phần của vật bất kỳ khác trong vũ trụ, bao gồm cá ươn.

Mọi phát biểu này đều đúng. Ấn tượng về một sự hoang tưởng nào đó đối với Vật lý lượng tử chỉ là sự trùng hợp ngẫu nhiên.

Tóm tắt: Vật lý lượng tử, định luật và sự tuyên truyền

Chỉ một lượng tử tác dụng hay lượng tử biến đổi thôi mà đã có nhiều hệ quả sâu sắc: sự ngẫu nhiên, lưỡng tính sóng-hạt, biến đổi vật chất, cái chết và điều chủ yếu là những tập quán tư duy mới mẻ.

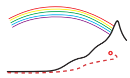
Không phải mọi điều suy diễn từ khái niệm lượng tử tác dụng mà ta đã trình bày cho đến giờ trông có vẻ sai hay ít nhất là điên rồ hay sao? Thật ra nếu bạn và luật sư của mình đã phát biểu về Vật lý lượng tử ở toà án thì dù đã tuyên thệ, bạn vẫn có thể bị ngồi tù! Tuy vậy, mọi phát biểu trên đều đúng: tất cả đều đã được chứng minh bằng thực nghiệm. Và còn nhiều điều đáng ngạc nhiên nữa. Có thể bạn đã nhận ra rằng, trong các thí dụ trước, ta đã chưa nói cụ thể về điện, tương tác hạt nhân hay lực hấp dẫn. Trong các lĩnh vực này có nhiều điều đáng kinh ngạc hơn. Các nghiên cứu về phản vật chất, siêu dẫn, chuyển động trong cơ bắp, năng lượng của chân không, phản ứng hạt nhân trong ngôi sao, và – có lẽ đến một ngày nào đó – hiện tượng sôi của không gian trống rỗng, sẽ còn mê hoặc bạn nhiều như nó đã từng mê hoặc và vẫn tiếp tục quyến rũ hàng ngàn nhà nghiên cứu nữa.

Đặc biệt, hệ quả của lượng tử tác dụng đối với các vũ trụ xa xưa quả thật là phi thường. Câu đố 27 d Bạn chỉ cần tìm hiểu các hệ quả của nó về big bang. Tất cả các đề tài này sẽ hướng dẫn ta đi trên một con đường dài hướng tới mục tiêu của cuộc thám hiểm của chúng ta. Các hệ quả của lượng tử tác dụng đều kỳ dị, khó tin, và phong phú đến nỗi người ta có thể gọi Vật lý lượng tử là sự mô tả chuyển động dành cho các khoa học gia *điên rồ*. Trong chừng mực nào đó, điều này đã tổng quát hoá định nghĩa Vật lý lượng tử trước kia thành sự mô tả chuyển động có liên quan tới niềm hoan lạc.

Điều không may là đôi khi có người phàn nàn rằng 'không có ai hiểu Thuyết lượng tử'. Trang 168 Điều này không đúng. Thật ra nó còn tệ hơn là sai: đó là sự tuyên truyền và thông tin sai lạc. Tuyên truyền và thông tin sai lạc là những phương pháp ngăn cản con người tự quyết và hưởng thụ cuộc sống. Trong thực tế, mọi người đều có thể hiểu và thích thú với

các hệ quả của lượng tử tác dụng. Để thực hiện điều đó, công việc đầu tiên của chúng ta trên con đường hoàn thành cuộc thám hiểm sẽ là sử dụng lượng tử tác dụng để nghiên cứu chuẩn cổ điển của chuyển động: chuyển động của ánh sáng.

> “Nie und nirgends hat es Materie ohne
> Bewegung gegeben, oder kann es sie geben.”
> Friedrich Engels, *Chống Dühring*.*



Xem 12

* ‘Không bao giờ và cũng không ở nơi nào có vật chất mà không có chuyển động.’ Friedrich Engels (1820–1895) lý thuyết gia chủ nghĩa Marx.

Chương 2

Ánh sáng – các hệ quả kỳ lạ của lượng tử tác dụng

> "Alle Wesen leben vom Lichte,
> jedes glückliche Geschöpfe."
> Friedrich Schiller, *Wilhelm Tell*.**

Vì mọi màu sắc của vật chất đều là hiệu ứng lượng tử nên ta bắt buộc phải nghiên cứu tính chất của ánh sáng. Nếu thực sự có một biến đổi nhỏ nhất, thì đó sẽ là độ rọi nhỏ nhất trong thiên nhiên. Kết luận này đã được rút ra từ thời cổ Hy Lạp, thí dụ như Epicurus (341–271 BCE), là người đã phát biểu rằng ánh sáng là dòng các hạt nhỏ. Độ rọi khả hữu nhỏ nhất lúc đó sẽ là độ rọi của một hạt ánh sáng đơn lẻ. Ngày nay, hạt đó được gọi là *lượng tử ánh sáng* hay *photon*. Điều khó tin là Epicurus có thể đã tự kiểm chứng tiên đoán của mình bằng một thí nghiệm.

Xem 13

Các ngọn đèn mờ đã hành xử như thế nào?

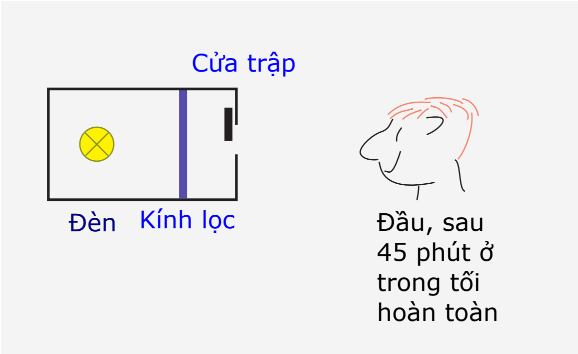
Xem 14

Vào khoảng năm 1930, Brumberg và Vavilov đã tìm thấy một phương pháp đẹp đẽ để kiểm tra sự hiện hữu của photon bằng cách dùng mắt và một cái đèn. Mắt của chúng ta không cho phép *nhận biết* những photon đơn lẻ nhưng Brumberg và Vavilov đã tìm ra cách tránh được giới hạn này. Thật ra thí nghiệm này đơn giản đến nỗi người ta đã có thể thực hiện nó trước đây nhiều thế kỷ; nhưng không ai có đủ trí tưởng tượng để làm thử.

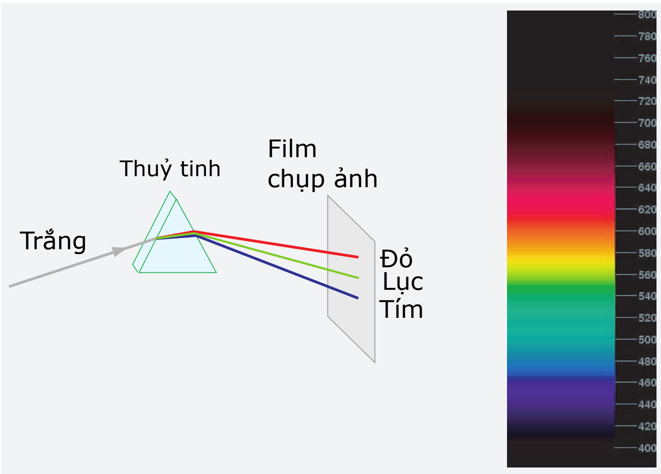
Brumberg và Vavilov đã chế tạo một cửa trập cơ học có thể mở ra trong thời gian 0.1 s. Ở phía bên kia màn, trong một phòng hoàn toàn tối đen, họ chiếu sáng khe hở bằng một đèn xanh lục rất mờ: khoảng 200 aW bước sóng 505 nm, như trong Hình 14. Với cường độ đó, khi cửa trập mở ra, có trung bình khoảng 50 photon đi qua. Đây đúng là ngưỡng độ nhạy của mắt. Để thực hiện thí nghiệm, họ lặp lại việc nhìn vào cửa trập lúc mở. Kết quả tuy đơn giản nhưng đáng kinh ngạc. Có lúc họ thấy ánh sáng, có lúc không. Việc thấy hay không, hoàn toàn ngẫu nhiên. Brumberg và Vavilov giải thích một cách đơn giản rằng lúc công suất đèn nhỏ, do sự thăng giáng, trong một nửa thời gian, số photon lớn hơn ngưỡng của mắt, còn một nửa thời gian thì nhỏ hơn ngưỡng. Sự thăng giáng có tính ngẫu nhiên và sự nhận biết ánh sáng cũng vậy. Điều này sẽ *không* xảy ra nếu ánh sáng là một dòng *liên tục*: trong trường hợp đó, mắt sẽ nhận thấy ánh sáng mỗi lúc cửa trập mở ra. (Ở cường độ ánh sáng lớn, tỷ lệ không thấy giảm đi nhanh chóng, tương ứng với sự giải thích ở trên.)

Tóm lại, thí nghiệm đơn giản này chứng tỏ:

** 'Mọi vật đều sống và hạnh phúc nhờ ánh sáng.' Friedrich Schiller (b. 1759 Marbach, d. 1805 Weimar), thi sĩ, nhà soạn kịch và sử gia.



HÌNH 14 Cách cảm nhận tác dụng của một photon (hãy đọc trong sách).

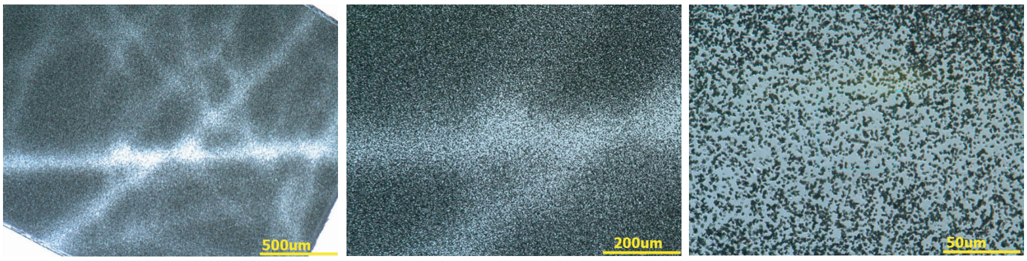


HÌNH 15 Quang phổ của ánh sáng trắng đã xuất hiện trên màn đặt rất xa như thế nào? (Quang phổ trên màn đặt gần như đã thấy, © Andrew Young, được tối ưu hoá cho màn hình CRT, chứ không phải cho việc in màu, như đã giải thích trên trang mintaka.sdsu.edu/GF/explain/optics/rendering.html.)

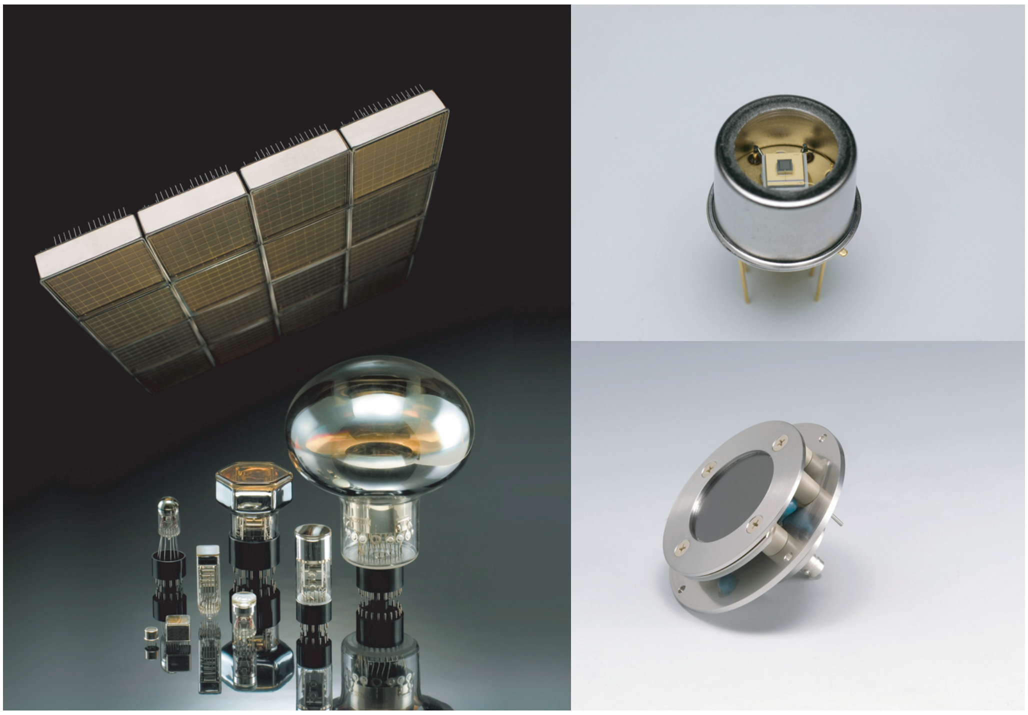
▷ Ánh sáng được tạo thành từ các photon.

Không ai biết lý thuyết về ánh sáng sẽ phát triển như thế nào nếu thí nghiệm đơn giản này đã được thực hiện trước đây 100 hay ngay cả 2500 năm.

Tính hiện thực của photon sẽ có sức thuyết phục hơn nếu ta dùng thêm thiết bị trợ giúp. Cách đơn giản là bắt đầu bằng một tấm màn đặt sau một lăng kính được chiếu bằng ánh sáng trắng, như trong Hình 15. Ánh sáng được phân tách thành nhiều màu. Khi màn được đặt càng ngày càng xa, độ rọi không thể nhỏ tuỳ ý, vì như thế sẽ mâu thuẫn với lượng tử tác dụng. Để kiểm chứng điều tiên đoán này, ta chỉ cần một số phim chụp ảnh đen trắng. Film hoá đen khi gặp ánh sáng bất kể màu; nó trở nên xám đậm khi cường độ sáng trung bình và xám nhạt khi cường độ sáng nhỏ hơn. Nhìn một phim xám rất nhạt dưới kính hiển vi, ta khám phá ra rằng, dù độ rọi có đều, sắc độ xám thực sự được tạo thành từ các chấm đen, được phân bố với mật độ cao hoặc thấp. Tất cả các chấm này có kích thước như nhau, như đã thấy trong Hình 16. Kích thước đều đặn cho ta thấy film ảnh chỉ tương tác với một photon đơn lẻ. Việc nghiên cứu kỹ càng khẳng định cho giả định này; trong thế kỷ 20, các nhà sản xuất film ảnh đã giải thích rõ ràng cơ chế nguyên tử nền tảng của hiện tượng này.



HÌNH 16 Film ảnh đã được phơi sáng, có độ phóng đại tăng dần (© Rich Evans).

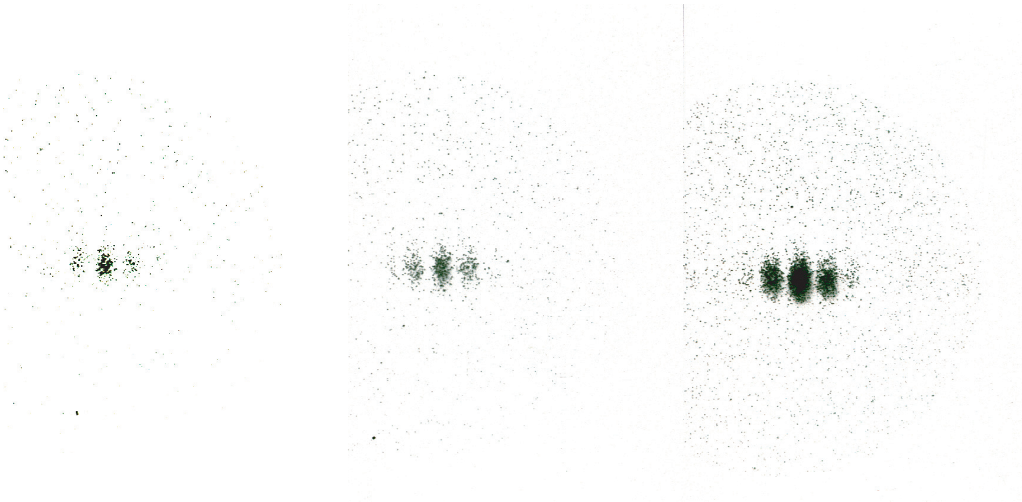


HÌNH 17 Các máy dò cho phép đếm được số photon: ống nhân quang (hình bên trái), quang diode kiểu thác đổ (hình trên bên phải, c. 1 cm) và anode đa kênh (hình dưới bên phải, c. 10 cm) (© Hamamatsu Photonics).

Người ta có thể dò ra các photon đơn lẻ một cách nhẹ nhàng nhất nhờ các thiết bị điện tử. Những thiết bị như vậy có thể là ống nhân quang, quang diode, anode đa kênh hay các tế bào hình que trong mắt; các thiết bị được tập hợp trong Hình 17. Các máy dò này cũng cho ta thấy rằng ánh sáng có cường độ nhỏ *không thể* tạo ra một màu thuần nhất: trái lại, nó lại tạo ra các hình ngẫu nhiên có số chấm như nhau, kể cả khi ta quan sát hiện tượng sóng điển hình như các hình giao thoa trong Hình 18. Ngày nay, việc ghi và đếm các photon riêng lẻ là một phương pháp thực nghiệm tiêu chuẩn. Máy đếm photon là một bộ phận của nhiều phổ kế, như những máy dùng để đo nồng độ vật chất rất nhỏ, có thể phát hiện ma tuý trong tóc của người.

Xem 15

Các thí nghiệm đều cho thấy cùng một kết quả: khi các máy dò nhạy sáng được chế tạo với mục đích ‘nhìn thấy’ thật chính xác – trong các môi trường thật tối – thì người



Hình 18 Sóng ánh sáng có cấu tạo hạt: việc quan sát các photon – các chấm đen trong các âm bản này – trong thí nghiệm 2 khe với cường độ ánh sáng nhỏ, thời gian phơi sáng 1, 2 và 5 s, có sử dụng máy tăng cường ánh sáng (© Delft University of Technology).



Hình 19 Một nguyên tử phát xạ một photon chỉ kích khởi một máy dò và chỉ giật lùi theo một hướng.

ta nhận thấy rằng ánh sáng thể hiện là một dòng các *lượng tử ánh sáng*. Ngày nay chúng thường được gọi là *photon*, một thuật ngữ xuất hiện vào năm 1926. Ánh sáng có cường độ nhỏ hay lớn tương ứng với dòng có số photon ít hay nhiều.

Một thí dụ đặc biệt thú vị về nguồn sáng có cường độ nhỏ là một nguyên tử. Nguyên tử là các hình cầu nhỏ. Khi nguyên tử phát ra ánh sáng hay tia X, bức xạ được phát ra như một sóng cầu. Nhưng trong mọi thí nghiệm – như ta thấy trong Hình 19 một sự xếp đặt điển hình – ánh sáng do nguyên tử phát ra *không bao giờ* tạo ra một sóng cầu, ngược với điều ta mong đợi trong vật lý thông thường. Khi một nguyên tử phát xạ được nhiều máy dò bao quanh, thì chỉ có *một* máy dò bị kích khởi. Chỉ khi lấy trung bình trên nhiều lần phát xạ và máy dò ta mới có được hình cầu. Các thí nghiệm chứng tỏ rằng ta không thể dò ra một phần của photon.

Như vậy mọi thí nghiệm trong ánh sáng mờ đều chứng tỏ rằng việc mô tả ánh sáng

là một môi trường liên tục là không đúng. Tất cả những thí nghiệm như vậy đều chứng minh trực tiếp ánh sáng là một dòng hạt như Epicurus đã đề ra trong thời Hy Lạp xa xưa. Những phép đo chính xác hơn đều khẳng định vai trò của lượng tử tác dụng: mỗi photon ứng với một độ biến đổi *như nhau*. Mọi photon có cùng tần số đều làm đen một tấm film hay kích khởi một màn hình nhấp nháy theo cùng một cách. Tóm lại, độ biến đổi do một photon cảm ứng thực sự là độ biến đổi *nhỏ nhất* mà ánh sáng có thể tạo ra.

Nếu không có tác dụng nhỏ nhất, ta có thể đóng gói ánh sáng thành những lượng nhỏ tuỳ ý. Nhưng thiên nhiên thì khác. Nói một cách đơn giản: sự mô tả cổ điển của ánh sáng bằng một vector thế *liên tục* $A(t, x)$, hay một trường điện từ $F(t, x)$, mà sự tiến hoá được mô tả bằng nguyên lý tác dụng cực tiểu là *sai lầm*. Các hàm liên tục không mô tả các tác dụng của các hạt được quan sát. Ta cần một sự mô tả có điều chỉnh. Sự điều chỉnh chỉ có ý nghĩa khi cường độ ánh sáng nhỏ, vì khi cường độ lớn, như gặp trong đời sống thông thường thì Lagrangian cổ điển cũng có thể mô tả chính xác mọi quan sát thực nghiệm.*

Quyển III, trang 87

Ở cường độ nào thì ánh sáng không còn thể hiện như một sóng? Thị giác của con người không cho phép ta phân biệt từng photon, mặc dù các thí nghiệm chứng tỏ rằng về nguyên tắc mắt có thể làm được điều đó. Ngôi sao yếu nhất mà ta có thể thấy được vào ban đêm tạo ra một cường độ sáng khoảng 0.6 nW/m^2. Vì con ngươi của mắt nhỏ và ta không thể thấy từng photon, photon phải có năng lượng nhỏ hơn 100 aJ. Thí nghiệm của Brumberg và Vavilov đã xác định một giới hạn trên khoảng 20 aJ.

Xem 16

Giá trị chính xác của lượng tử tác dụng trong ánh sáng phải được suy ra từ các thí nghiệm. Dưới đây là một số thí dụ.

Photon

Nhìn chung mọi thí nghiệm đều chứng tỏ rằng một chùm ánh sáng có tần số f hay tần số góc ω, đại lượng xác định màu của nó, được mô tả một cách chính xác là một dòng photon, mỗi photon có cùng năng lượng E được cho bởi hệ thức

$$E = \hbar\, 2\pi f = \hbar\, \omega\ . \tag{8}$$

Hệ thức này do Max Planck tìm ra năm 1899. Ông nhận thấy rằng đối với ánh sáng, tác dụng nhỏ nhất có thể đo được là lượng tử tác dụng $\hbar$. Tóm lại, *màu sắc* là một tính chất của photon. Một chùm ánh sáng màu là một cơn mưa đá các photon tương ứng. Giá trị của *hằng số Planck* có thể xác định từ các phép đo các thể đen hay các nguồn sáng khác. Các phép đo như vậy trùng với kết quả

Quyển III, trang 149
Trang 215

$$\hbar = 1.054\,571\,726(47) \cdot 10^{-34}\ \text{Js}\ , \tag{9}$$

một giá trị nhỏ đến nỗi ta có thể hiểu được lý do tại sao con người không thể nhận ra photon. Thí dụ, một photon lục với bước sóng 555 nm có năng lượng 0.37 aJ. Thật ra trong điều kiện sáng bình thường photon nhiều đến nỗi việc ta xem trường điện từ gần đúng là liên tục cũng rất chính xác. Trong bóng đêm, tính không nhạy của mắt người trong việc xử lý tín hiệu – đặc biệt là sự chậm chạp của các thụ thể ánh sáng – làm cho ta

Câu đố 28 e

* Sự chuyển từ mô tả cổ điển sang mô tả lượng tử thường được gọi là *sự lượng tử hoá*. Khái niệm này và những ý tưởng bao hàm, ngày nay chỉ có ý nghĩa lịch sử.

Xem 16
không thể đếm được số photon. Tuy vậy, độ nhạy của mắt cũng khá gần với độ nhạy cực đại khả hữu. Với số liệu ta đã có về các ngôi sao mờ, ta có thể ước tính rằng con người có thể *nhận thấy*, với điều kiện lý tưởng, chớp sáng có khoảng nửa tá photon; trong điều kiện bình thường, con số cao hơn khoảng 10 lần.

Ta hãy tìm hiểu các tính chất khác của photon. Trước hết, photon không có khối lượng (nghỉ) và điện tích. Bạn có thể chứng minh điều này không? Đúng ra các thí nghiệm chỉ có thể cung cấp các giới hạn trên cho 2 đại lượng này. Hiện nay giới hạn trên có từ thí nghiệm đối với khối lượng (nghỉ) của một photon là 10^{-52} kg và của điện tích là $5 \cdot 10^{-30}$ lần điện tích của electron. Những giới hạn này bé đến nỗi ta có thể yên tâm nói rằng cả hai đều bằng 0.

Câu đố 29 s
Xem 17

Ta cũng đã biết rằng ánh sáng cường độ lớn có thể *đẩy* các vật. Vì năng lượng và tốc độ của photon đã biết, ta suy ra được động lượng của photon là

Câu đố 30 e

$$p = \frac{E}{c} = \hbar \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{hay} \quad \boldsymbol{p} = \hbar \boldsymbol{k} \,. \qquad (10)$$

Nói cách khác, nếu ánh sáng do các hạt tạo nên, ta có thể dùng chúng để chơi billiard. Điều này có thể xảy ra như Arthur Compton đã chứng tỏ trong một thí nghiệm nổi tiếng năm 1923. Ông đã chiếu tia X, các photon có năng lượng lớn, lên graphite, một chất mà trong nó electron chuyển động gần như tự do. Ông nhận thấy rằng khi electron trong chất đó bị các photon của tia X va chạm thì tia X thay đổi màu và bị lệch đi. Thí nghiệm của ông được trình bày trong Hình 20. Cường độ va chạm liên hệ với góc lệch của photon như ta mong đợi. Từ sự thay đổi màu sắc và góc lệch, Compton đã chứng minh rằng động lượng của photon thoả biểu thức sau $\boldsymbol{p} = \hbar \boldsymbol{k}$.

Xem 18

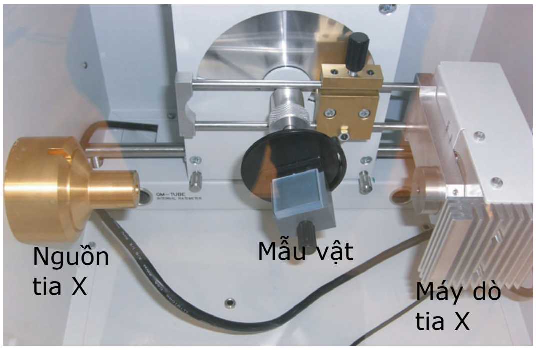
Tất cả các thí nghiệm khác đều phù hợp với việc photon có động lượng. Thí dụ như khi một nguyên tử *phát ra* ánh sáng thì nó bị *giật lùi*. Động lượng lại được tính bởi biểu thức $\boldsymbol{p} = \hbar \boldsymbol{k}$. Tóm lại, lượng tử tác dụng xác định động lượng của photon.

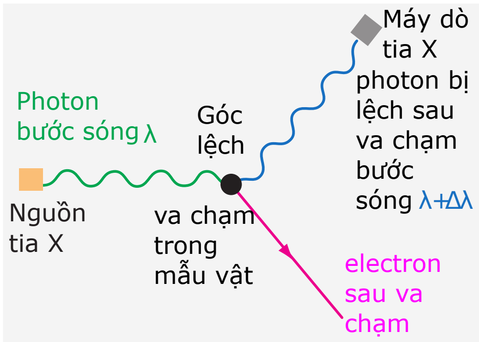
Động lượng của photon tuân theo hệ thức bất định. Thí dụ như ta không thể đo chính xác bước sóng và vị trí của đỉnh sóng, và vì vậy ta không thể đo vừa động lượng vừa vị trí của photon. Bạn có thể chứng minh điều này không? Động lượng của photon là hệ quả trực tiếp của lượng tử tác dụng.

Câu đố 31 s

Từ kiến thức trong vật lý cổ điển, ta biết rằng ngoài màu sắc, ánh sáng còn một tính chất nữa là nó có thể *bị phân cực*. Đó chỉ là một cách nói phức tạp để diễn tả việc ánh sáng có thể *quay* các vật mà nó chiếu vào. Nói cách khác, ánh sáng có một moment động lượng định hướng (chủ yếu) dọc theo phương truyền. Còn photon thì sao? Các phép đo đều cho ta thấy rằng mỗi lượng tử ánh sáng mang theo một *moment động lượng* có trị số là $L = \hbar$. Nó được gọi là *độ xoắn*. Đại lượng này tương tự như đại lượng mà các hạt có khối lượng đã có: do đó ta cũng có thể nói về *spin* của một photon. Tóm lại, photon bằng cách nào đó đã 'quay' – theo hướng song song hay đối song với hướng chuyển động của chúng. Độ lớn của độ xoắn của photon, hay spin, không làm ta ngạc nhiên; nó khẳng định hệ thức cổ điển $L = E/\omega$ giữa năng lượng và moment động lượng mà ta đã thấy trong phần Điện động lực học cổ điển. Cũng nên nhớ một điều phản trực giác rằng moment động lượng của 1 photon thì cố định và như vậy độc lập với năng lượng của nó. Ngay cả các photon giàu năng lượng nhất cũng có $L = \hbar$. Dĩ nhiên độ xoắn cũng tuân theo giới hạn mà lượng tử tác dụng đặt ra.

Quyển III, trang 123
Quyển III, trang 123





Hình 20 Một phiên bản hiện đại của thí nghiệm Compton đặt vừa trên một cái bàn. Thí nghiệm cho ta thấy photon có động lượng: tia X – và như vậy là photon tạo nên tia X – thay đổi tần số khi chúng chạm vào electron trong vật chất theo đúng như cách mà ta đã tiên đoán từ sự va chạm của các hạt (© Helene Hoffmann).

Ánh sáng là gì?

> La lumière est un mouvement luminaire de corps lumineux.
>
> Blaise Pascal*

Vào thế kỷ 17, Blaise Pascal đã sử dụng phát biểu trên về ánh sáng để chế giễu các vật lý gia bằng cách dùng một định nghĩa lòng vòng. Dĩ nhiên ông đã đúng: vào thời của ông, định nghĩa này lòng vòng thật sự, vì không có một thuật ngữ nào trong đó có ý nghĩa. Nhưng khi các nhà vật lý nghiên cứu cẩn thận, các triết gia phải chịu thua. Mọi thuật ngữ ban đầu không được định nghĩa bây giờ đã có ý nghĩa xác định và việc định nghĩa lòng vòng được giải quyết. Ánh sáng thực sự là một loại chuyển động; chuyển động này có thể được gọi đúng là 'chuyển động sáng' vì trái với chuyển động của các vật thể, nó có tính chất độc nhất vô nhị $v = c$; các vật thể phát quang, được gọi là *lượng tử ánh sáng* hay *photon*, được đặc trưng và phân biệt với các loại hạt khác bằng hệ thức tán sắc của chúng $E = cp$, năng lượng của chúng $E = \hbar\omega$, spin của chúng $L = \hbar$, sự biến mất của các lượng tử số khác và tính chất là lượng tử của trường điện từ.

Tóm lại, *ánh sáng là một dòng các photon*. Nó thực sự là một 'chuyển động sáng của các vật thể phát quang'. Photon cho chúng ta thí dụ đầu tiên về tính chất tổng quát của thế giới vi mô: *tất cả sóng và dòng chảy trong thiên nhiên đều do các hạt lượng tử tạo thành*. Một số lớn các hạt lượng tử (điều hợp) – hay *quanton* – vận hành và tạo thành sóng. Ta sẽ thấy ngay sau đây đó cũng là trường hợp của vật chất. Quanton là thành phần cơ bản của *mọi* sóng và *mọi* dòng chảy mà không có ngoại lệ. Như vậy, việc mô tả ánh sáng thông thường có tính liên tục, xét về nhiều mặt, cũng tương tự như việc mô tả nước là một lưu chất liên tục: photon là các nguyên tử của ánh sáng và tính liên tục là một xấp xỉ đúng đối với một số lớn các hạt. Quanton đơn lẻ có hành trạng giống các các hạt cổ điển.

Các sách vật lý thường bàn luận dài dòng về điều được gọi là *lưỡng tính sóng-hạt*. Chúng ta hãy làm rõ ngay từ đầu: quanton hay hạt lượng tử, *không phải là* sóng cổ điển

* 'Ánh sáng là chuyển động sáng của các vật thể phát quang.' Blaise Pascal (b. 1623 Clermont, d. 1662 Paris), toán gia và vật lý gia quan trọng cho tới năm 26 tuổi, sau đó ông trở thành nhà thần học và triết gia.

và *cũng không phải là* hạt cổ điển. Trong thế giới vi mô, quanton là các vật thể cơ bản.

Tuy vậy, vẫn còn nhiều điều chưa rõ ràng. Trong vật chất, các photon đơn sắc này từ đâu đến? Hay thú vị hơn, nếu ánh sáng do quanton tạo thành thì mọi trường điện từ, ngay cả tĩnh trường, cũng phải do photon tạo nên. Tuy vậy, trong các tĩnh trường không có cái gì đang chảy. Các mâu thuẫn biểu kiến này được giải quyết như thế nào? Và tính chất hạt đối với các tĩnh trường này bao hàm điều gì? Sự khác nhau giữa quanton và các hạt cổ điển là gì?

Kích thước của photon

Trước tiên ta có thể hỏi: Những photon này được cái gì tạo thành? Cho đến nay mọi thí nghiệm đã được thực hiện đến giới hạn khoảng 10^{-20} m đều cho cùng một câu trả lời: 'ta không thể tìm thấy cái gì cả.' Điều này nhất quán với việc khối lượng và kích thước của photon bằng 0. Thật vậy, theo trực giác, ta mong chờ một vật với kích thước hữu hạn sẽ có một khối lượng hữu hạn. Như vậy, mặc dù các thí nghiệm chỉ cho một giới hạn trên, nó nhất quán với việc cho rằng một photon có *kích thước bằng 0*.

Một hạt có kích thước bằng 0 không thể phân ra thành các phần nhỏ hơn. Như vậy không thể phân chia một photon thành các thực thể nhỏ hơn: photon không phải là một vật phức hợp. Vì lý do này, chúng được gọi là các hạt *sơ cấp*. Ta sẽ cho ngay một số luận chứng mạnh hơn của kết quả này. (Bạn có thể tìm ra không?) Tuy vậy, làm thế nào để một photon có kích thước bằng 0, không thể chia nhỏ mà vẫn là *một cái gì đó*? Đây là một câu hỏi khó; câu trả lời chỉ xuất hiện trong quyển cuối cùng của cuộc phiêu lưu. Do đó ta tìm đến một câu hỏi dễ hơn.

Câu đố 32 s

Có thể đếm được photon không? – Ánh sáng bị nén lại

> Also gibt es sie doch.
>
> Max Planck*

Ở trên ta đã thấy rằng cách đơn giản nhất để đếm các photon là phân tán chúng trên một màn rộng rồi hấp thu trở lại. Nhưng cách này chưa hoàn hảo vì nó phá huỷ photon. Làm cách nào để ta có thể đếm photon mà không phá huỷ chúng?

Có một cách là cho chúng phản xạ trên một cái gương rồi đo độ giật lùi của gương. Việc đó hầu như không thể tin được nhưng ngày nay hiệu ứng này lại có thể đo được ngay cả với số photon rất nhỏ. Và người ta phải tính đến việc dùng các gương laser được sử dụng trong các máy phát hiện sóng hấp dẫn, mà vị trí của nó có thể xác định được với độ chính xác rất cao.

Quyển II, trang 185

Còn một cách khác để đếm photon mà không phá huỷ chúng là sử dụng một hốc cộng hưởng laser chất lượng cao. Người ta có thể đếm được photon dựa trên những tác dụng của chúng trên các nguyên tử được đặt một cách khéo léo trong các hốc như vậy.

Nói cách khác, người ta có thể đo được cường độ ánh sáng mà không cần hấp thu nó. Những phép đo này chứng minh một điều quan trọng: ngay cả các chùm ánh sáng tốt nhất, phát ra từ các laser phức tạp nhất, cũng có cường độ *thăng giáng*. *Không có* chùm

* 'Vậy là sau cùng thì chúng có thật.' Max Planck, trong những năm cuối đời, đã thốt lên như vậy sau khi đứng yên lặng rất lâu trước dụng cụ đếm photon bằng cách phát ra tiếng động khi nó phát hiện ra photon. Trong phần lớn của cuộc đời mình, Planck luôn hoài nghi về khái niệm photon mặc dù những thí nghiệm và kết luận của ông là điểm khởi đầu cho sự ra mắt của nó.

ánh sáng đều. Điều này không làm ta ngạc nhiên: nếu một chùm ánh sáng *không* thăng giáng thì việc quan sát nó 2 lần sẽ cho một tác dụng bằng 0. Tuy vậy, có một tác dụng cực tiểu trong thiên nhiên, cụ thể là $\hbar$. Như vậy một chùm hay một dòng bất kỳ trong thiên nhiên *phải* thăng giáng. Nhưng chưa hết.

Một chùm ánh sáng được mô tả, theo thiết diện ngang, bằng cường độ và phase của nó. Độ biến đổi – hay tác dụng – xảy ra trong khi chùm ánh sáng truyền đi được cho bởi tích của cường độ và phase. Các thí nghiệm khẳng định cho kết luận hiển nhiên này: cường độ và phase của một chùm ánh sáng hành xử giống như động lượng và vị trí của hạt khi tuân theo hệ thức bất định. Bạn có thể tìm ra kết quả này bằng cách làm giống như khi ta thiết lập hệ thức của Heisenberg. Bằng cách dùng cường độ đặc trưng $I = E/\omega$, năng lượng của chùm chia cho tần số góc và gọi phase là φ, ta được *

$$\Delta I\, \Delta\varphi \geqslant \frac{\hbar}{2}\,. \tag{12}$$

Tương tự, tích các độ bất định của số photon trung bình $n = I/\hbar = E/\hbar\omega$ và phase φ tuân theo hệ thức:

$$\Delta n\, \Delta\varphi \geqslant \frac{1}{2}\,. \tag{13}$$

Đối với ánh sáng phát ra từ một ngọn đèn thông thường, được gọi là *bức xạ nhiệt*, tích các độ bất định bên vế trái của bất đẳng thức trên là một con số lớn. Tương tự, tích các độ bất định của tác dụng (12) là một bội khá lớn của lượng tử tác dụng.

Đối với các chùm laser, tức là các chùm *ánh sáng điều hợp*,** tích các độ bất định gần bằng 1/2. Một minh hoạ của ánh sáng điều hợp được cho trong Hình 22.

Ngày nay người ta có thể tạo ra ánh sáng sao cho tích của hai độ bất định trong phương trình (13) gần bằng 1/2, nhưng có hai giá trị *khác nhau* (theo đơn vị của *không gian phase* được minh hoạ trong Hình 21). Ánh sáng như vậy được gọi là ánh sáng *phi cổ điển* hay *bị nén*. Thống kê của các photon đó sẽ là phân bố Poisson dịch chuyển hay hạ-Poisson. Các chùm ánh sáng như thế đòi hỏi các phòng thí nghiệm phức tạp để tạo ra chúng và được sử dụng trong nhiều ứng dụng nghiên cứu hiện đại. Ánh sáng phi cổ điển phải được xử lý cực kỳ thận trọng vì các nhiễu loạn nhỏ nhất sẽ biến đổi nó trở thành ánh sáng điều hợp thông thường (hay ngay cả bức xạ nhiệt), trong đó thống kê Poisson (hay ngay cả Bose-Einstein) vẫn còn đúng. Một tổng quan về các loại chùm ánh sáng được trình bày trong Hình 21, cùng với hành trạng về cường độ và phase của chúng.

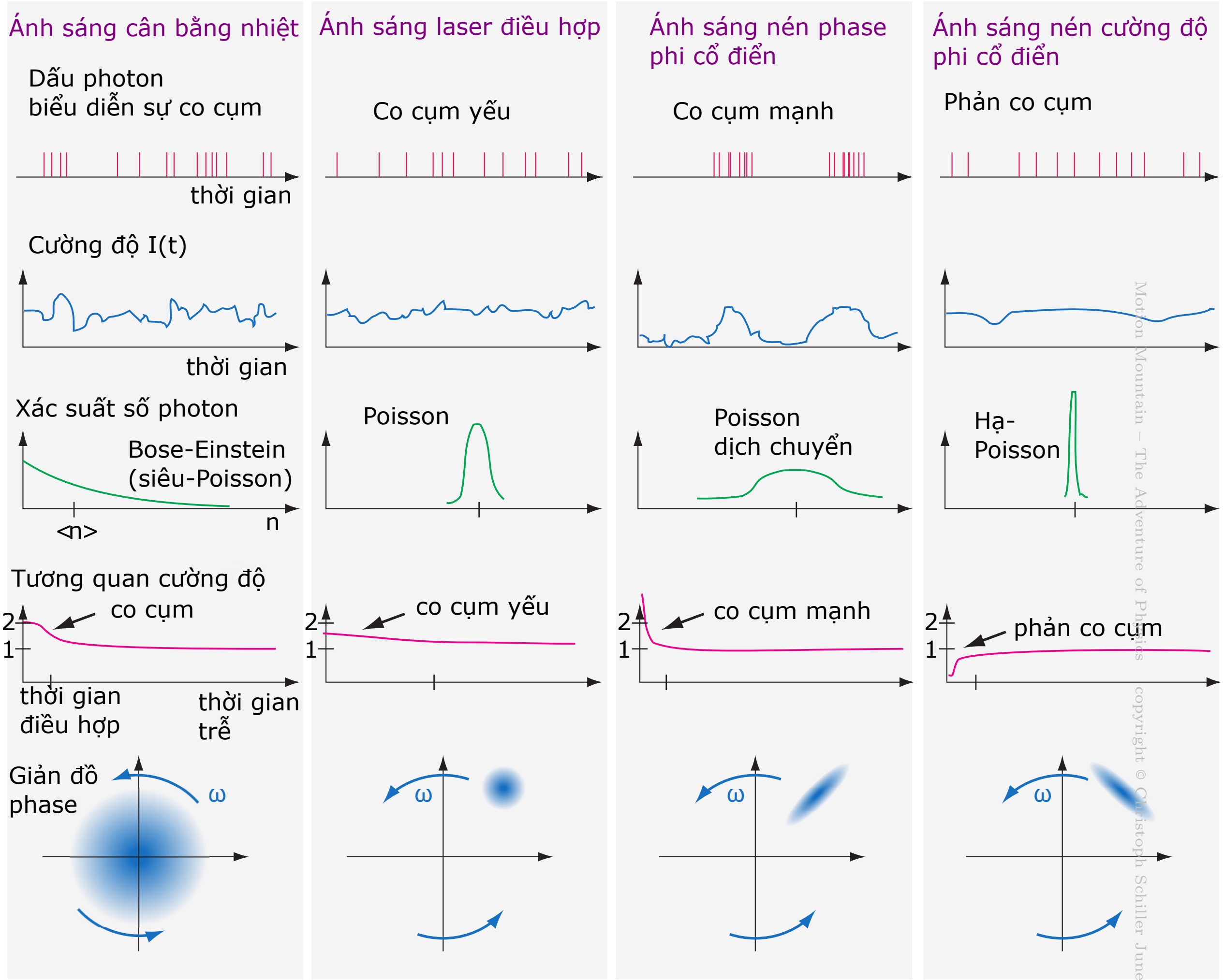
Xem 19

* Ta giả sử số photon trong biểu thức rất lớn. Điều này là hiển nhiên vì $\Delta\varphi$ không thể tăng quá giới hạn. Hệ thức đúng là

$$\Delta I\, \Delta\cos\varphi \geqslant \frac{\hbar}{2}|\langle\sin\varphi\rangle|$$
$$\Delta I\, \Delta\sin\varphi \geqslant \frac{\hbar}{2}|\langle\cos\varphi\rangle| \tag{11}$$

trong đó $\langle x\rangle$ ký hiệu cho giá trị kỳ vọng của biến động lực x.

** Ánh sáng điều hợp là ánh sáng mà phân bố xác suất của số photon là phân bố Poisson; đặc biệt, phương sai bằng với số photon trung bình. Ánh sáng điều hợp được mô tả tốt nhất khi bao gồm các photon ở trạng thái lượng tử điều hợp. *Trạng thái điều hợp* (chính tắc) hay *trạng thái Glauber*, theo lý thuyết, là một trạng thái với $\Delta\varphi \to 1/n$ và $\Delta n \to n$.



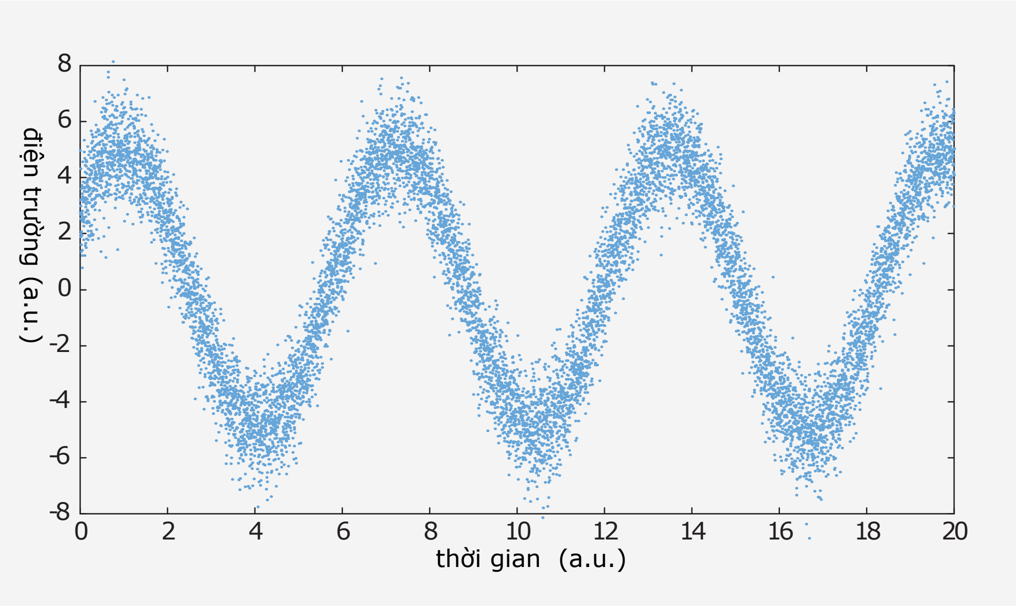
HÌNH 21 Bốn loại ánh sáng và tính chất photon của chúng: bức xạ nhiệt, ánh sáng laser và hai loại ánh sáng bị nén phi cổ điển.

(Nhiều tính chất được trình bày trong trong hình chỉ xác định trong một ô của không gian phase.)

Một cực hạn của ánh sáng phi cổ điển là *ánh sáng bị nén phase*. Vì một chùm ánh sáng bị nén phase (gần như) có một phase xác định, số photon trong một chùm như vậy thăng giáng từ zero tới (gần như) vô hạn. Nói cách khác, để tạo ra ánh sáng laser điều hợp thật hoàn hảo gần như một sóng hình sin thuần tuý, ta phải chấp nhận số photon có một độ bất định. Một chùm ánh sáng như vậy có độ thăng giáng phase nhỏ đến nỗi có thể cho ta một độ chính xác cao trong phép đo giao thoa; độ ồn phase cực nhỏ.

Một cực hạn khác của ánh sáng phi cổ điển là một chùm ánh sáng với số photon cố định và do đó có độ bất định về phase cực lớn. Trong một *chùm ánh sáng bị nén biên độ*, phase sẽ thăng giáng một cách thất thường.* Ánh sáng bị nén phi cổ điển này là loại ánh

* Các trạng thái lượng tử thích hợp nhất để mô tả ánh sáng như vậy được gọi là *trạng thái số*, hoặc đôi khi



HÌNH 22 Một cách đơn giản để minh hoạ độ bất định của cường độ và phase của chùm ánh sáng: điện trường đo được của một sóng điện từ điều hợp có cường độ nhỏ, bao gồm khoảng một tá photon. Sóng hình sin mờ mịt tương ứng với giản đồ phase của hình dưới cột thứ hai trong phần tổng quan phía trước. Khi số photon lớn, có thể bỏ qua biên độ ồn tương đối. (© Rüdiger Paschotta)

sáng lý tưởng trong việc dùng để đo chính xác cường độ vì nó cho một độ ồn cường độ thấp nhất. Trong loại ánh sáng này các photon có tính *phản co cụm*. Để hiểu rõ hơn, hãy vẽ các đồ thị tương ứng với Hình 22 đối với ánh sáng bị nén phase và ánh sáng bị nén biên độ .

Câu đố 33 s

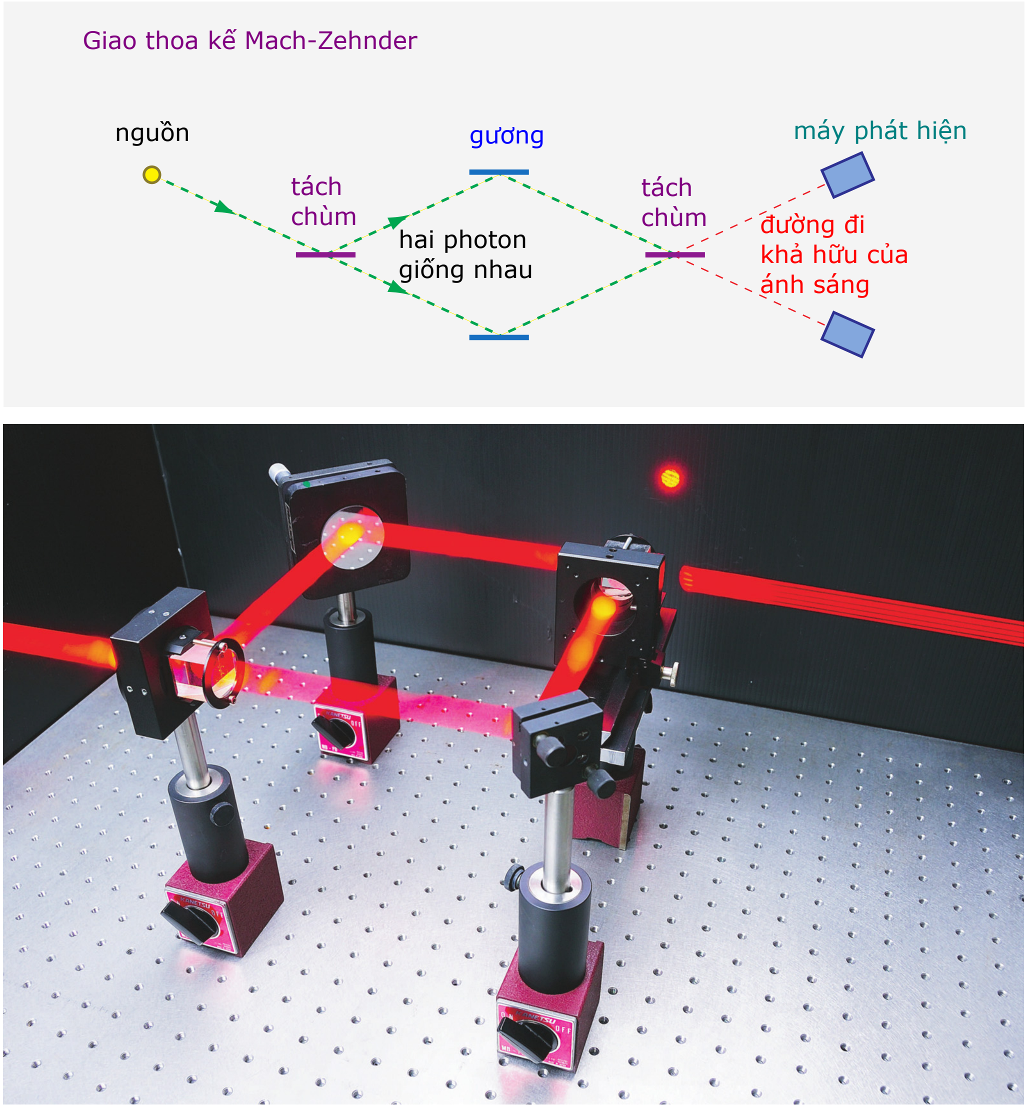
Trái lại, *ánh sáng điều hợp* phát ra từ bút trình chiếu laser và các laser khác nằm giữa hai loại ánh sáng bị nén: độ bất định của phase và của số photon có độ lớn như nhau.

Các quan sát về bức xạ nhiệt, ánh sáng laser điều hợp và phi cổ điển làm nổi bật một tính chất quan trọng của thiên nhiên: số photon trong một chùm ánh sáng không phải là một lượng xác định. Nói chung, nó không xác định và *thăng giáng*. Photon khác các viên đá vì ta không thể đếm chính xác số lượng của chúng – khi chúng đang truyền đi và không bị hấp thu. Ta chỉ có thể xác định số photon trung bình, gần đúng, khi chúng đang bay, trong giới hạn của độ bất định. Khi cho rằng: số photons lúc bắt đầu chùm ánh sáng không nhất thiết phải bằng số photon lúc cuối, thì có đúng hay không?

Câu đố 34 ny

Sự thăng giáng số photon chủ yếu là ở tần số quang học. Ở tần số vô tuyến, sự thăng giáng số photon thường có thể bỏ qua do năng lượng của photon thấp và số photon lại nhiều. Ngược lại, ở tần số của tia gamma, tác dụng sóng ít quan trọng hơn. Thí dụ như ta đã thấy rằng trong không gian giữa các thiên hà tối đen và sâu thẳm, cách xa các ngôi sao, chỉ có khoảng 400 photon/centimet khối; chúng tạo thành bức xạ nền vũ trụ. Mật

là *trạng thái Fock*. Đây là các trạng thái dừng tức là các trạng thái riêng của Hamiltonian và chứa một số photon cố định.



HÌNH 23 Giao thoa kế Mach–Zehnder và thể hiện của nó trong thực tế, có kích thước khoảng 0.5 m (© Félix Dieu và Gaël Osowiecki).

độ photon này, giống như số photon trong một chùm ánh sáng, cũng có một độ bất định về số đo. Bạn có thể ước tính số đó không?

Câu đố 35 s

Tóm lại, khác các viên sỏi, *photon có thể đếm được nhưng số lượng của chúng thì không cố định.* Và đây không phải là sự khác nhau duy nhất giữa photon và sỏi.

Vị trí của photon

Photon ở đâu khi nó chuyển động trong một chùm ánh sáng? Thuyết lượng tử cho ta một câu trả lời đơn giản: không ở một chỗ đặc biệt nào cả. Điều này được chứng minh một cách ngoạn mục nhất nhờ các thí nghiệm với giao thoa kế, như giao thoa kế cơ bản

trong Hình 23. Giao thoa kế chứng tỏ rằng ngay cả chùm ánh sáng chỉ có *một* photon cũng có thể bị tách ra, đi theo hai con đường khác nhau rồi kết hợp lại. Kết quả giao thoa chứng tỏ rằng ta không thể nói là một photon đơn lẻ đã đi theo con đường nào. Nếu một trong hai con đường bị chặn, hình ảnh trên màn sẽ thay đổi. Nói cách khác, bằng cách nào đó, photon phải đi theo cả hai con đường cùng một lúc. Photon không định xứ: chúng không có vị trí.*

Ta đi đến kết luận: xung ánh sáng vĩ mô có đường đi nhưng các photon của nó thì không. Photon không có vị trí lẫn quỹ đạo. Chỉ có một số lớn photon mới có vị trí và quỹ đạo và điều đó chỉ là gần đúng.

Ta có thể lượng hoá mức độ không thể có photon định xứ. Hiện tượng giao thoa chứng tỏ rằng không thể định vị photon theo hướng *ngang* với hướng chuyển động. Việc định vị photon *dọc* theo hướng chuyển động có thể dễ hơn một chút, khi nó là một phần của xung ánh sáng, nhưng đây là một sai lầm. Lượng tử tác dụng dẫn đến một điều là độ bất định vị trí theo phương dọc ít nhất cũng bằng bước sóng của ánh sáng. Bạn có thể chứng minh điều này không? Hoá ra là photon chỉ có thể định xứ trong phạm vi một *độ dài điều hợp*. Đúng ra thì trong trường hợp tổng quát, độ dài điều hợp ngang và dọc khác nhau. Độ dài điều hợp dọc (chia cho c) còn được gọi là độ điều hợp thời gian, hay đơn giản là *thời gian điều hợp*. Điều này cũng được chỉ ra trong Hình 21. Việc không thể định vị các photon là hệ quả của lượng tử tác dụng. Thí dụ như độ dài điều hợp ngang là do độ bất định của động lượng ngang; độ lớn của các tác dụng đối với các con đường dẫn đến các điểm cách nhau nhỏ hơn một độ dài điều hợp sẽ sai khác với nhau ít hơn một lượng tử tác dụng $\hbar$. Khi một photon được phát hiện ra tại một nơi nào đó, thí dụ như do sự hấp thu, thì ta *không thể* nói *chính xác* về hướng hay nguồn gốc của nó. Tuy vậy, đôi khi trong các trường hợp đặc biệt có thể có một xác suất cao đối với một hướng hay một nguồn nào đó.

Câu đố 36 e

Trang 50

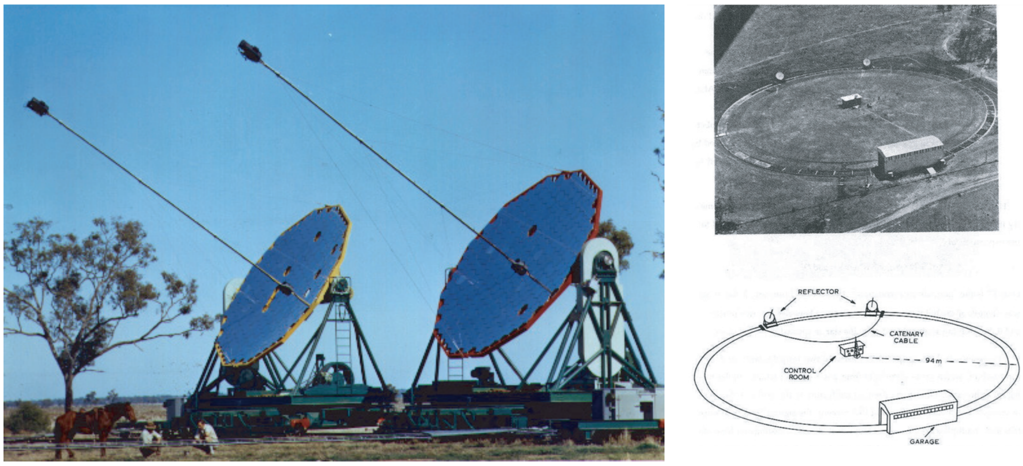
Việc thiếu sự định xứ có nghĩa là photon *không thể* được hình dung một cách đơn giản là một đoàn sóng ngắn. Thí dụ như ta không thể tăng độ dài điều hợp bằng cách gởi ánh sáng xuyên qua một bộ lọc nhỏ hẹp. Photon thực sự là một thực thể *không thể định vị được*, đặc biệt đối với thế giới lượng tử. Photon không phải là một viên đá hay một gói sóng nhỏ. Ngược lại, 'quang lộ', 'vị trí xung ánh sáng' và 'sự điều hợp' là các tính chất của một tập hợp photon, và *không* áp dụng cho 1 photon đơn lẻ.

Khi photon *gần như* định xứ dọc theo hướng chuyển động, như trong ánh sáng điều hợp, ta có thể thắc mắc về cách các photon xếp hàng nối đuôi nhau trong một chùm ánh sáng. Dĩ nhiên ta có thể thấy rằng sẽ vô nghĩa khi nói về vị trí *chính xác* của chúng. Nhưng có phải, các photon trong một chùm ánh sáng hoàn hảo, cập bến sau những khoảng thời gian gần như đều đặn không?

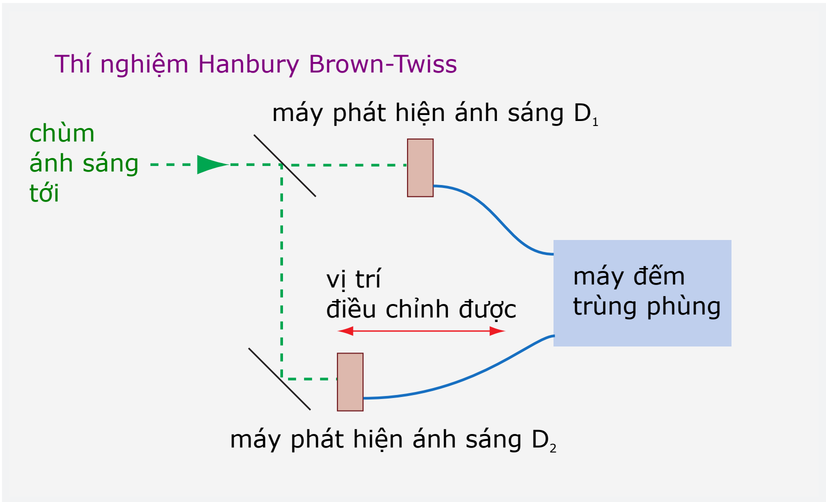
Việc nghiên cứu sự tương quan của photon được hai thiên văn gia là Robert Hanbury Brown và Richard Twiss, khởi đầu năm 1956 và gặp phải sự hoài nghi trong nhiều năm. Họ thay đổi khoảng cách ngang của hai máy dò như trong Hình 24 – từ một vài m tới 188 m – và đo sự tương quan cường độ giữa chúng. Hanbury Brown và Twiss nhận thấy rằng sự thăng giáng cường độ trong thể tích điều hợp có tương quan. Như vậy các photon có tương quan. Bằng thí nghiệm này, người ta có thể đo đường kính của

Xem 20

* Ta không thể né tránh kết luận này bằng cách nói rằng photon *bị tách ra* ở chỗ dụng cụ tách chùm: nếu ta đặt máy dò ở hai bên, ta sẽ thấy rằng chúng không bao giờ phát hiện ra một photon cùng một lúc. Photon không thể bị chia cắt.



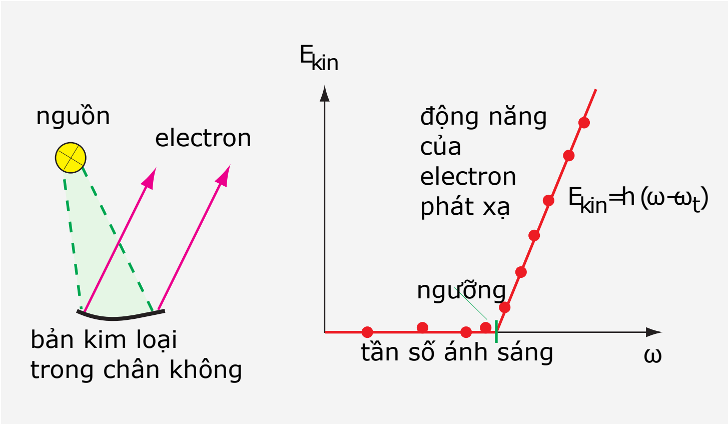
HÌNH 24 Bộ các thiết bị thí nghiệm mà Hanbury Brown và Twiss sử dụng để đo đường kính sao ở Narrabri, Australia. Khoảng cách giữa hai máy thu ánh sáng có thể thay đổi được bằng cách di chuyển chúng trên các đường ray. Các máy phát hiện ánh sáng nằm ngay đầu máy thu và chúng 'gom ánh sáng giống như hứng mưa vào một cái xô.' (© John Davis).



HÌNH 25 Cách thống kê photon bằng một bộ tương quan cường độ điện tử hay máy đếm trùng phùng, độ biến thiên được đo bằng cách thay đổi vị trí của máy phát hiện ánh sáng.

nhiều ngôi sao ở xa.

Lấy cảm hứng từ sự thành công của Hanbury Brown và Twiss, các nhà nghiên cứu phát triển một phương pháp đơn giản để đo xác suất mà một photon thứ hai trong một chùm tia sáng đến sau photon thứ nhất tại thời điểm đã cho. Họ chỉ đơn giản tách chùm sáng, đặt một máy dò trong nhánh đầu tiên và thay đổi vị trí cúa máy dò thứ hai trong nhánh khác. Bộ thí nghiệm được phác hoạ trong Hình 25. Ngày nay một thí nghiệm như vậy được gọi là *Thí nghiệm Hanbury Brown Twiss*. Người ta đã nhận thấy rằng: đối với ánh sáng điều hợp trong thể tích điều hợp, các tiếng tí tách trong 2 máy đếm – và đó cũng là photon – có tính *tương quan*. Chính xác hơn, những thí nghiệm như vậy chứng tỏ rằng khi photon đầu tiên đến thì photon thứ hai gần như đến ngay sau đó. Như vậy,



HÌNH 26 Động năng của electron phát ra trong hiệu ứng quang điện.

photon trong các chùm ánh sáng *co cụm lại*. Sự co cụm là một trong nhiều kết quả chứng tỏ rằng photon là các quanton, các hạt mà ta thực sự cần để mô tả ánh sáng và chúng là các thực thể không thể định vị được. Như ta sẽ thấy dưới đây, kết quả này cũng hàm ý rằng photon là các boson.

Trang 65

Mỗi chùm ánh sáng có một giới hạn trên về thời gian để co cụm: đó là *thời gian điều hợp*. Trường hợp thời gian dài hơn thời gian điều hợp, xác suất co cụm sẽ nhỏ và độc lập với thời gian như ta thấy trong Hình 25. Thời gian điều hợp đặc trưng cho mọi chùm sáng. Đúng ra thì suy nghĩ theo *độ dài điều hợp* của chùm ánh sáng thì dễ hơn. Đối với bức xạ nhiệt, độ dài điều hợp thường chỉ vài micromet: một số nhỏ lần bước sóng. Độ dài điều hợp lớn nhất khoảng trên 300 000 km, kiếm được nhờ sự nghiên cứu các laser có băng thông rất hẹp cỡ 1 Hz. Điều thú vị là người ta tìm thấy ánh sáng điều hợp ngay trong thiên nhiên do nhiều ngôi sao đặc biệt phát ra.

Xem 21

Mặc dù cường độ của một chùm laser chuẩn thì gần như không thay đổi, các photon không di chuyển một cách đều đặn. Ngay cả ánh sáng của một laser tốt nhất cũng cho thấy có sự co cụm, mặc dù với mức độ khác nhau và với nhiệt độ nhỏ hơn ánh sáng của một ngọn đèn, như được minh hoạ trong Hình 21. Ánh sáng có photon di chuyển một cách đều đặn, sẽ bộc lộ *hiện tượng phản co cụm (photon)*, hiển nhiên là mang ý nghĩa phi cổ điển như đã định nghĩa ở trên; người ta chỉ có thể tạo ra ánh sáng như vậy bằng những cách bố trí thí nghiệm đặc biệt. Hiện nay nhiều nhóm khoa học gia đã nghiên cứu các trường hợp thật đặc biệt nhằm mục đích tạo ra các nguồn sáng phát ra từng photon, sau những khoảng thời gian thật đều đặn, thật chính xác. Ta có thể nói một cách ngắn gọn rằng việc thống kê thật chính xác các photon trong một chùm ánh sáng phụ thuộc vào kết cấu của nguồn sáng.

Trang 50

Tóm lại, các thí nghiệm buộc chúng ta kết luận rằng ánh sáng do các photon tạo nên nhưng ta cũng không thể định vị các photon trong một nguồn sáng. Một cách tổng quát thì nói về vị trí của một photon là điều vô nghĩa; ý tưởng đó chỉ có ý nghĩa trong một số trường hợp đặc biệt và đó chỉ là giá trị trung bình thống kê, gần đúng.

Photon có cần thiết không?

Dưới ánh sáng của các kết quả tìm được cho đến nay câu trả lời cho các câu hỏi trên khá hiển nhiên. Nhưng vấn đề vẫn còn rắc rối. Trong sách giáo khoa, *hiệu ứng quang điện* thường được người ta trích dẫn để làm bằng chứng thực nghiệm đầu tiên và hiển nhiên nhất cho sự hiện hữu của photon. Năm 1887, Heinrich Hertz quan sát được điều đó trong một số kim loại như lithium hay caesium, sẽ tích điện khi được chiếu bằng tia tử ngoại. Những nghiên cứu về hiệu ứng này sau đó chứng tỏ rằng ánh sáng gây ra sự phát xạ electron và năng lượng của các electron bắn ra không phụ thuộc vào cường độ ánh sáng mà chỉ phụ thuộc vào hiệu số giữa $\hbar$ x tần số ánh sáng và ngưỡng năng lượng (phụ thuộc vào bản chất kim loại). Hình 26 tóm tắt các thí nghiệm và các phép đo.

Trong vật lý cổ điển, hiệu ứng quang điện rất khó giải thích. Nhưng năm 1905, Albert Einstein đã suy diễn được một số kết quả từ việc giả sử ánh sáng được tạo thành từ các photon có năng lượng $E = \hbar\omega$. Ông đã tưởng tượng rằng một phần năng lượng này được eletron sử dụng để vượt qua ngưỡng và một phần để cung cấp cho electron một động năng. Nhiều photon chỉ làm tăng số electron chứ không làm cho chúng chuyển động nhanh hơn. Năm 1921, Einstein nhận giải Nobel do đã giải thích được hiệu ứng quang điện. Nhưng Einstein là một *thiên tài*: ông đã suy ra được một kết quả đúng bằng một lý luận có phần chưa đúng. Có một sai lầm (nhỏ) khi ông đã giả sử rằng một chùm ánh sáng liên tục, cổ điển sẽ tạo ra một hiệu ứng khác. Đúng ra cũng dễ nhận ra rằng một trường điện từ liên tục, cổ điển tương tác với vật chất rời rạc, được tạo thành từ các nguyên tử rời rạc chứa các electron rời rạc, sẽ dẫn tới cùng một kết quả như nhau, miễn là chuyển động của electron được mô tả bằng Thuyết lượng tử. Nhiều nhà nghiên cứu đã chứng minh điều này trước kia trong thế kỷ 20. Bản thân hiệu ứng quang điện cũng *không* suy ra được sự hiện hữu của photon.

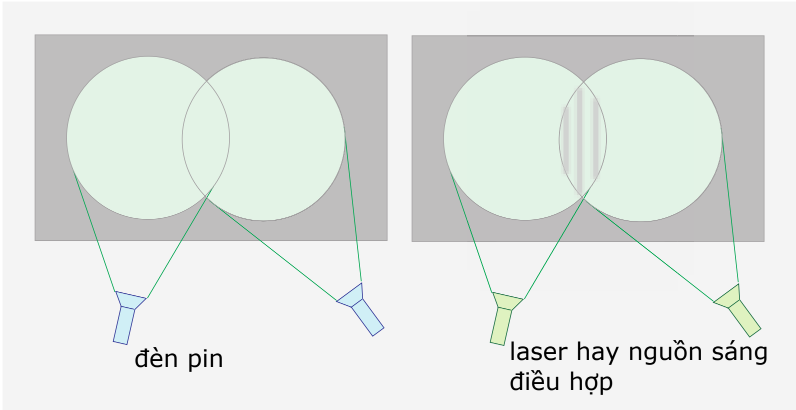
Xem 22
Xem 23

Thật vậy, nhiều nhà nghiên cứu trong quá khứ cũng không đồng ý rằng hiệu ứng quang điện chứng minh cho sự hiện hữu của photon. Về mặt lịch sử, luận chứng quan trọng nhất cho *tính tất yếu* của lượng tử ánh sáng do Henri Poincaré đưa ra. Năm 1911 và 1912, ở tuổi 57 và chỉ còn vài tháng trước khi qua đời, ông đã công bố hai bài báo quan trọng chứng minh định luật bức xạ của thể đen – trong đó lượng tử tác dụng đã được Max Planck khám phá – *đòi hỏi* sự hiện hữu của photon. Ông cũng chứng tỏ rằng lượng bức xạ do một vật nóng phát ra là *hữu hạn* chỉ vì bản chất *lượng tử* của các quá trình dẫn tới việc phát xạ ánh sáng. Việc mô tả các quá trình này theo Điện động lực học cổ điển sẽ dẫn tới năng lượng bức xạ (hầu như) tăng lên *vô hạn*. Hai bài báo quan trọng của Poincaré thuyết phục rất nhiều nhà vật lý nên cũng đáng cho ta nghiên cứu các hiện tượng lượng tử chi tiết hơn. Poincaré không biết về giới hạn tác dụng $S \geqslant \hbar$; tuy vậy luận chứng của ông dựa trên việc quan sát thấy ánh sáng với tần số đã cho có một cường độ cực tiểu, cụ thể là một photon riêng lẻ. Chùm một photon như vậy có thể bị tách làm 2 chùm, thí dụ như bằng cách sử dụng một gương bán mạ. Tuy vậy, khi gộp lại, 2 chùm này không bao giờ chứa nhiều hơn một photon riêng lẻ.

Xem 24

Một thí nghiệm thú vị khác cũng cần khái niệm photon là việc quan sát thấy các 'các phân tử photon'. Năm 1995, Jacobson và cộng sự đã tiên đoán rằng có thể quan sát thấy bước sóng de Broglie của một *gói* photon. Theo Thuyết lượng tử, bước sóng của một gói bằng bước sóng của 1 photon/số photon trong gói. Nhóm khoa học gia cũng cho rằng có thể quan sát được bước sóng của gói nếu ta có thể tách/kết hợp nó mà không phá huỷ sự cố kết bên trong nó. Năm 1999, de Pádua và cộng sự đã quan sát thấy hiện tượng này

Xem 25



HÌNH 27 Hai trường hợp ánh sáng giao với ánh sáng: các nguồn sáng khác nhau dẫn đến các kết quả khác nhau.

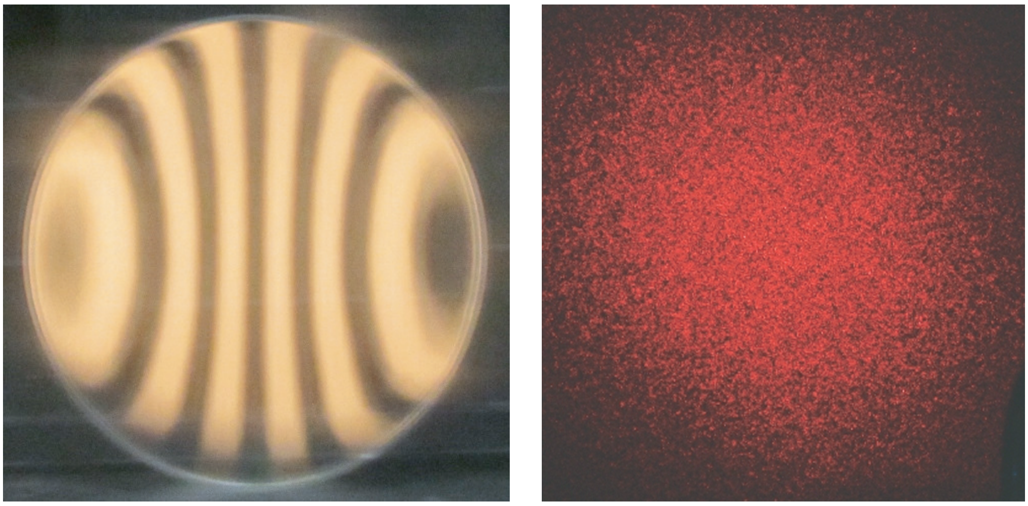
ở Brazil. Họ đã thiết kế kỹ lưỡng một thí nghiệm với một tinh thể phi tuyến để tạo ra một *cặp photon* và đã quan sát được các tính chất giao thoa của chúng khi tìm thấy bước sóng hiệu dụng giảm đi hai lần như đã tiên đoán. Từ đó, người ta đã tạo ra và quan sát được các gói 3 hay 4 photon liên đới. Xem 26

Tuy vậy còn một luận cứ khác cho tính tất yếu của photon là hiện tượng giật lùi của nguyên tử khi phát xạ ánh sáng đã đề cập ở trên. Trang 44 Độ giật lùi đo được trong trường hợp này được giải thích một cách tốt nhất bằng sự phát xạ một photon theo một hướng đặc biệt. Trái lại, Điện động lực học cổ điển lại tiên đoán nguyên tử phát xạ một sóng cầu không có hướng ưu tiên.

Trang 50 Hiển nhiên là việc quan sát *ánh sáng phi cổ điển*, còn được gọi là *ánh sáng bị nén*, cũng chứng minh cho sự hiện hữu của photon, vì ánh sáng bị nén chứng tỏ rằng photon thực sự là một đặc điểm *riêng* của ánh sáng, cần có ngay cả khi không có sự tương tác với vật chất. Điều tương tự cũng đúng đối với hiệu ứng Hanbury Brown–Twiss. Xem 27

Sau cùng sự phân rã tự phát của các trạng thái nguyên tử kích thích cũng cần có photon. Điều này không thể dùng cách mô tả ánh sáng liên tục để giải thích được.

Tóm lại, khái niệm photon thực sự cần cho việc mô tả ánh sáng một cách chính xác nhưng các chi tiết thường khó nhận ra vì photon có các tính chất khác thường, đòi hỏi ta phải thay đổi tập quán tư duy. Để tránh những vấn đề này, phần lớn sách giáo khoa không bàn về photon sau khi đã nói về hiệu ứng quang điện. Đây là một điều đáng tiếc vì đến lúc đó mọi việc mới trở nên thú vị. Hãy suy nghĩ về điều sau đây. Hiển nhiên là mọi trường điện từ đều do photon tạo ra. Hiện nay người ta có thể đếm photon của tia gamma, tia X, ánh sáng tử ngoại, ánh sáng khả kiến và ánh sáng hồng ngoại. Tuy vậy, đối với tần số nhỏ hơn, như sóng vô tuyến, người ta chưa phát hiện ra photon. Bạn có thể tưởng tượng ra điều cần chuẩn bị để đếm được các photon phát ra từ một trạm vô tuyến không? Câu đố 37 s Vấn đề này trực tiếp dẫn đến câu hỏi quan trọng nhất:



HÌNH 28 Các thí dụ về hình giao thoa xuất hiện khi các chùm ánh sáng điều hợp giao nhau: hiện tượng giao thoa do một gương parabol của kính thiên văn tự làm, có đường kính 27 cm, tạo ra và các vết laser lốm đốm trên một mặt nhám (© Mel Bartels, Epzcaw).

Giao thoa: sóng đã được tạo ra từ các hạt như thế nào?

> “Die ganzen fünfzig Jahre bewusster Grübelei haben mich der Antwort auf die Frage ‘Was sind Lichtquanten?’ nicht näher gebracht. Heute glaubt zwar jeder Lump er wisse es, aber er täuscht sich.”
>
> Albert Einstein, 1951 *

Nếu một sóng ánh sáng được các hạt tạo ra, thì ta phải có khả năng giải thích được mỗi/mọi tính chất sóng bằng khái niệm photon. Các thí nghiệm mà ta đã để cập ở trên cho thấy rằng điều này có thể xảy ra chỉ vì photon là các hạt *lượng tử*. Chúng ta hãy xem xét điều này chi tiết hơn.

Ánh sáng có thể *cắt ngang* một ánh sáng khác mà không làm nhiễu loạn nó, thí dụ như khi các chùm ánh sáng từ các đèn pin chiếu xuyên qua nhau. Việc quan sát này không khó giải thích nếu dùng photon; Vì các photon không tương tác với nhau, và giống như một chất điểm, chúng ‘không bao giờ’ đụng nhau. Thật ra *có* một xác suất dương cực nhỏ đối với tương tác của chúng, như ta sẽ thấy sau này, nhưng hiệu ứng này không thể thấy được trong đời sống hằng ngày.

Quyển V, trang 130

Nhưng nếu hai chùm ánh sáng *điều hợp*, tức là hai chùm ánh sáng có cùng tần số và độ lệch pha không đổi giao nhau ta sẽ thấy các vùng sáng và tối xen kẽ nhau: đó là *các vân giao thoa*. Sơ đồ sắp xếp các dụng cụ thí nghiệm được trình bày trong Hình 27. Các thí dụ về hiệu ứng giao thoa thực sự được cho trong Hình 28 và Hình 29. Các vân giao thoa đã xuất hiện như thế nào?** Tại sao ta không phát hiện được photon trong vùng

* ‘Năm mươi năm nghiền ngẫm đã không mang tôi tới gần câu trả lời cho câu hỏi ‘Lượng tử ánh sáng là gì?’ Ngày nay mỗi anh chàng lạc quan tếu đều nghĩ rằng anh ta biết nhưng anh ta đã sai.’ Einstein viết ra điều này vài năm trước khi ông qua đời trong một bức thư gởi cho Michele Besso.

Xem 28

** Nếu ta sử dụng laser thì chỉ có thể quan sát được các vân nếu hai chùm ánh sáng được tạo ra bằng cách



HÌNH 29 Hình trên: các hình giao thoa theo tính toán – không thể phân biệt với các vân được quan sát dưới điều kiện lý tưởng, theo "sách vở", – do hai khe hẹp song song được chiếu bằng ánh sáng lục và ánh sáng trắng tạo ra. Hình dưới: hai chùm sáng Gauss giao thoa dưới một góc nào đó (© Dietrich Zawischa, Rüdiger Paschotta).

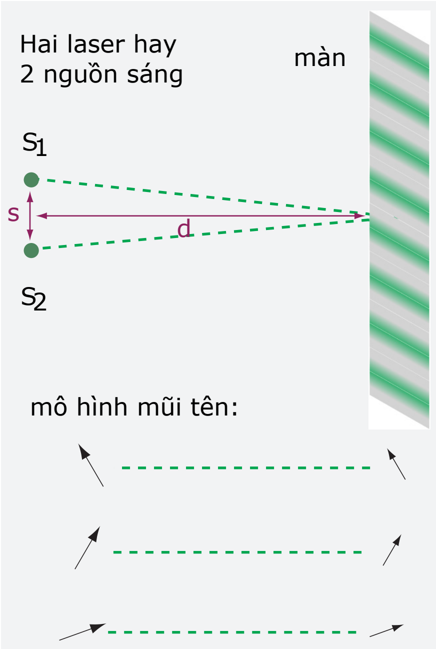
tối? Ta đã biết câu trả lời: độ sáng tại nơi đã cho tương ứng với *xác suất* một photon đi đến đó. Các vân giao thoa cho ta kết luận:

▷ Photon hành xử giống như các *mũi tên* nhỏ chuyển động.

Mô tả chi tiết hơn thì:

— Mũi tên luôn luôn vuông góc với phương chuyển động.
— Phương của mũi tên không đổi khi photon chuyển động.
— Chiều dài của một mũi tên giảm theo bình phương của khoảng cách di chuyển.
— *Xác suất để một photon đến một nơi nào đó được cho bởi bình phương chiều dài mũi tên.*
— *Mũi tên sau cùng là* tổng *của tất cả các mũi tên đến được vị trí đó theo mọi con đường khả hữu.*

Câu đố 38 s tách đôi một chùm ánh sáng hoặc ta sử dụng hai nguồn laser đắt tiền, có độ chính xác cao. (Tại sao?)



HÌNH 30 Giao thoa và sự mô tả ánh sáng bằng các mũi tên (ở 3 thời điểm khác nhau).

— Photon do các nguồn đơn sắc phát ra thì các mũi tên có chiều dài không đổi chỉ theo hướng của ωt; nói cách khác, những nguồn như vậy phun ra các photon bằng một cái miệng *quay tròn*.
— Photon do các nguồn không điều hợp phát ra – thí dụ như các nguồn nhiệt, đèn pin – thì các mũi tên có chiều dài không đổi chỉ theo các hướng *ngẫu nhiên*.

Bằng mô hình đơn giản này* ta có thể giải thích tính chất sóng của ánh sáng. Đặc biệt ta có thể mô tả các vân giao thoa đã thấy trong thí nghiệm dùng laser, như trong sơ đồ Hình 30. Bạn có thể kiểm tra là trong một số vùng, hai mũi tên du hành qua hai khe *luôn luôn* có tổng bằng zero. Ta không phát hiện được photon nào ở đó: những vùng như vậy có màu đen. Trong những vùng khác, các mũi tên này luôn luôn có tổng cực đại. Những vùng này luôn luôn sáng. Các vùng khác có độ đen trung gian. Điều hiển nhiên là trong trường hợp các đèn pin, được vẽ trong sơ đồ bên trái của Hình 27, độ sáng trong vùng chung cũng như ta mong đợi: việc tính các trị trung bình chỉ đơn giản là cộng lại.

Hiển nhiên là theo mô hình photon, một hình giao thoa được tạo thành từ việc tổng hợp một số lớn các va chạm của các photon riêng lẻ. Nhờ sử dụng các chùm ánh sáng cường độ yếu, ta sẽ có thể thấy cách mà các chấm nhỏ chậm chạp tạo dựng nên một hình giao thoa bằng cách tích luỹ trong vùng sáng và không bao giờ chạm vào các vùng tối. Mọi thí nghiệm đều khẳng định cho điều này.

Trang 44

Nói cách khác, hiện tượng giao thoa là sự chồng chập của các trường ánh sáng điều hợp, hay tổng quát hơn, của các trường điện từ điều hợp. Các trường ánh sáng điều hợp có hành trạng của photon đặc biệt và đều đặn hơn các trường ánh sáng không điều hợp.

* Mô hình này cho phép ta mô tả ánh sáng khá chính xác ngoại trừ một điều là nó bỏ qua sự phân cực. Để có thể mô tả thêm sự phân cực, ta cần kết hợp các mũi tên quay theo hai chiều ngược nhau quanh hướng chuyển động.

Tóm lại, photon là các hạt lượng tử. Các hạt lượng tử có thể tạo ra các hình giao thoa – và tất cả các hiệu ứng sóng khác – khi có một số lớn các hạt xuất hiện vì chúng được mô tả bằng mũi tên có bình phương của chiều dài biểu diễn cho xác suất phát hiện ra chúng.

Sự giao thoa của một photon đơn lẻ

Điều quan trọng mà ta cần chỉ ra ở đây là sự giao thoa giữa 2 chùm ánh sáng *không* phải là kết quả của 2 photon khác nhau loại trừ nhau hay cộng với nhau. Sự loại trừ như vậy sẽ mâu thuẫn với định luật bảo toàn năng lượng và động lượng. Sự giao thoa là một hiệu ứng có thể áp dụng cho từng photon riêng biệt – như ta đã thấy trong phần trước – vì mỗi photon trải rộng ra trên toàn bộ dụng cụ thí nghiệm: mỗi photon đi qua tất cả các con đường khả hữu. Như Paul Dirac đã nhấn mạnh:

Xem 29

▷ Mỗi photon chỉ giao thoa với chính nó mà thôi.

Sự giao thoa của một photon với chính nó chỉ xảy ra do photon là quanton chứ không phải là một hạt cổ điển.

Câu nói thường được trích dẫn của Dirac đưa tới một nghịch lý nổi tiếng: nếu một photon chỉ có thể giao thoa với chính nó thì làm thế nào để hai chùm laser từ hai laser khác nhau giao thoa với nhau? Câu trả lời của vật lý lượng tử khá đơn giản nhưng kỳ lạ: trong vùng nơi hai chùm ánh sáng giao thoa với nhau – như đã đề cập ở trên – ta không thể nói photon đã từ đâu đến. Ta cũng không thể nói photon trong vùng giao nhau đã đến từ nguồn nào. Photon trong vùng giao thoa cũng là các quanton, và thật sự, các hạt này chỉ giao thoa với chính chúng mà thôi.

Trang 52

Một cách mô tả khác của tình trạng này:

▷ Một photon chỉ giao thoa bên trong thể tích điều hợp của nó. Và ta không thể phân biệt được các photon trong vùng đó.

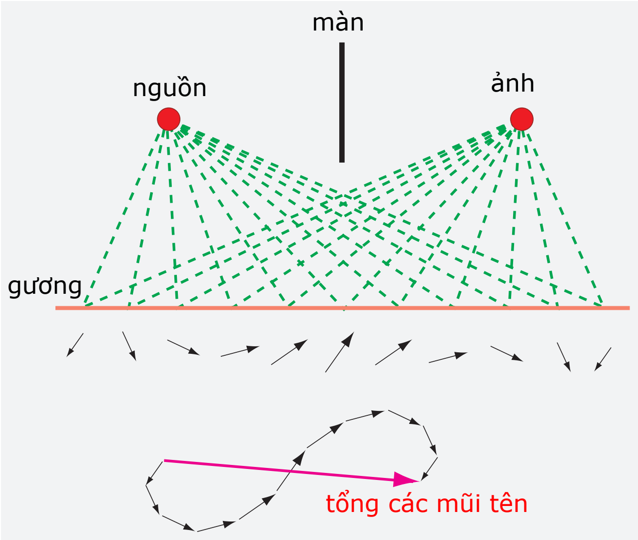
Trong thể tích điều hợp do các độ dài điều hợp ngang và dọc tạo nên – đôi khi còn được gọi là *tế bào/ô không gian phase* – ta không thể nói một cách tuyệt đối rằng ánh sáng là một dòng photon, vì ta không thể xác định bên trong dòng đó. Mặc dù thường bị cho là mâu thuẫn nhưng phát biểu của Dirac thì đúng. Như ta sẽ thấy dưới đây, nó là một hệ quả kỳ dị của lượng tử tác dụng.

Trang 67

Sự phản xạ và nhiễu xạ theo mô hình mũi tên photon

Sóng cũng có thể gây ra *hiện tượng nhiễu xạ*. Nhiễu xạ là sự thay đổi hướng truyền của ánh sáng hay một sóng bất kỳ khi đi gần các bờ cạnh. Để hiểu hiện tượng này theo bản chất photon, ta hãy bắt đầu với một cái gương đơn giản và tìm hiểu *hiện tượng phản xạ* trước. Photon (giống như các hạt lượng tử khác) chuyển động từ nguồn đến máy dò theo *tất cả* các con đường khả hữu. Như Richard Feynman,* người đưa ra cách giải thích này,

* Richard ('Dick') Phillips Feynman (b. 1918 New York City, d. 1988 Los Angeles), vật lý gia, là một trong các nhà sáng lập Điện động lực học lượng tử. Ông cũng là người phát minh ra cách tính 'tổng các lịch sử' trong Thuyết lượng tử, góp phần quan trọng trong Thuyết tương tác yếu và hấp dẫn lượng tử, và là đồng



HÌNH 31 Ánh sáng phản xạ trên một cái gương và các mũi tên tương ứng (tại mỗi thời điểm).

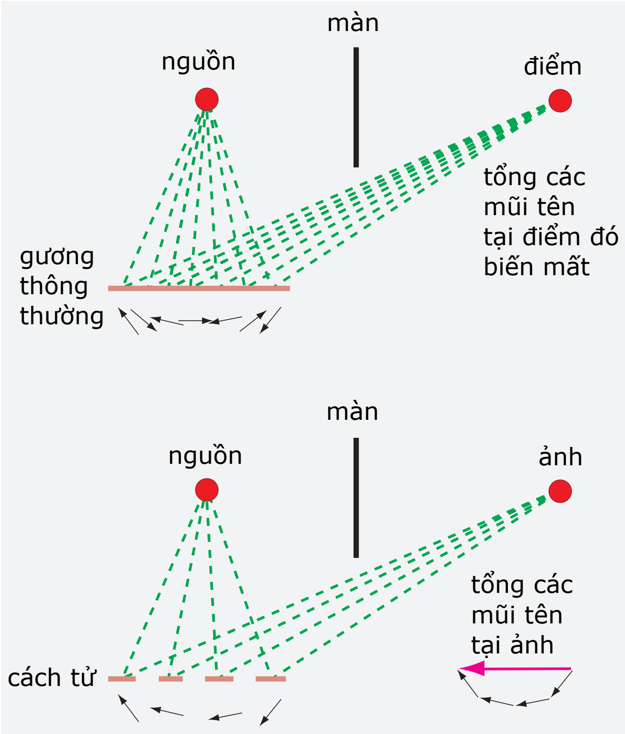
nhấn mạnh từ 'tất cả' phải được hiểu theo nghĩa đen. Đây không phải là một sự thoả hiệp trong việc giải thích hiện tượng giao thoa. Nhưng để hiểu một cái gương ta phải bao gồm mọi khả năng mặc dù chúng có vẻ hơi điên rồ như ta đã thấy trong Hình 31.

Như đã nói ở trên, một nguồn sáng phát ra các mũi tên quay. Để xác định xác suất để ánh sáng đến một vị trí nào đó của ảnh, ta phải cộng tất cả các mũi tên tới vị trí đó cùng lúc. Đối với mỗi con đường, hướng của mũi tên ở vị trí ảnh được vẽ – chỉ để cho tiện – bên dưới các phần gương tương ứng. Góc và chiều dài của mũi tên tới phụ thuộc vào đường đi. Ta nên nhớ rằng khi tổng tất cả các mũi tên khác 0: ánh sáng thực sự tới ảnh. Hơn nữa, phần đóng góp lớn nhất đến từ các đường đi gần trung tâm. Nếu ta thực hiện cùng một tính toán cho các vị trí ảnh khác, thì (gần như) không có ánh sáng đến đó.

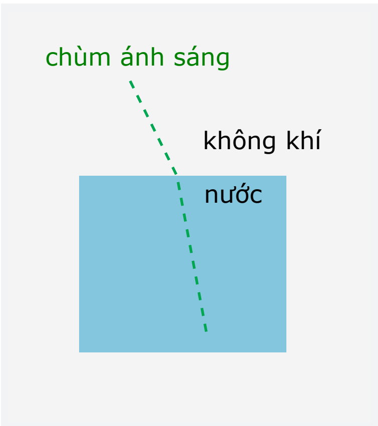
Tóm lại, định luật phản xạ - góc tới bằng góc phản xạ - chỉ gần đúng, theo mô hình mũi tên ánh sáng. Thực ra, khi tính toán chi tiết với nhiều mũi tên hơn, ta sẽ thấy rằng sự gần đúng cũng khá chính xác: sai số nhỏ hơn bước sóng của ánh sáng rất nhiều lần.

Một cái gương chuyên dụng sẽ cung cấp cho ta bằng chứng về việc ánh sáng thực sự đi theo mọi con đường. Như đã thấy trong Hình 32, ta có thể lặp lại thí nghiệm với một gương chỉ phản xạ dọc theo các dải nào đó. Các dải này đã được chọn lựa sao cho chiều dài của các con đường tương ứng sẽ khiến cho các mũi tên bị phân cực theo một hướng, cụ thể là bên trái. Việc cộng các mũi tên cho ta thấy rằng gương chuyên dụng – thường được gọi là *cách tử* – làm cho ánh sáng phản xạ theo các hướng khác thường. Hiện tượng này là một đặc trưng của sóng: nó được gọi là *sự nhiễu xạ*. Tóm lại, mô hình mũi tên của

tác giả của quyển sách giáo khoa nổi tiếng, *Các bài giảng về Vật lý của Feynman*, hiện nay có trên trang www.feynmanlectures.info. Ông là một trong những nhà vật lý lý thuyết tạo dựng sự nghiệp dựa trên công việc tính toán phức tạp – nhưng nhìn lại cuộc đời ông thì phần thành công nhất lại là việc dạy học và viết sách vật lý - những cuốn sách rất giá trị. Ông cống hiến đời mình cho vật lý, cho việc mở rộng kiến thức và đóng góp rất nhiều kiến giải vật lý đáng khâm phục. Ông góp phần trong việc chế tạo bom hạt nhân, viết các bài báo trong quán rượu, hay né tránh trách nhiệm và nổi tiếng kiêu căng, phách lối. Ông viết nhiều sách về các sự kiện trong đời mình. Suốt đời ông luôn nỗ lực vượt qua thiên tài Wolfgang Pauli nhưng thất bại. Ông nhận một phần giải Nobel vật lý năm 1965 nhờ công trình về Điện động lực học lượng tử.



HÌNH 32 Ánh sáng phản xạ của một cái gương vô dụng và của một cách tử.



HÌNH 33 Nếu ánh sáng được tạo thành từ các viên đá nhỏ thì trong nước chúng sẽ chuyển động nhanh hơn.

các photon cho phép ta mô tả tính chất sóng của ánh sáng, miễn là photon cho phép các sơ đồ xác suất 'điên rồ' xảy ra. Các bạn đừng bối rối! Như đã nói ở trên, Thuyết lượng tử là Thuyết dành cho những người điên.

Bạn có thể tự kiểm tra mô hình mũi tên, với sự gần đúng mà nó phát sinh, bằng cách lấy tổng trên mọi đường đi khả hữu, để bảo đảm rằng lượng tử tác dụng thực sự là tác dụng nhỏ nhất mà ta có thể quan sát được.

Câu đố 39 s

Sự khúc xạ và phản xạ một phần theo mô hình mũi tên photon

Mọi sóng đều có một *vận tốc truyền tín hiệu*. Vận tốc truyền tín hiệu cũng phụ thuộc vào môi trường mà sóng truyền qua. Kết quả là sóng sẽ *khúc xạ* khi chuyển động từ môi trường này sang môi trường khác với vận tốc truyền tín hiệu khác nhau. Điều thú vị là việc hình dung (một cách ngây thơ) photon là các viên đá nhỏ sẽ dẫn tới việc ánh sáng sẽ chuyển động nhanh hơn trong các môi trường vật chất có chiết suất lớn: vật chất lúc đó được gọi là đậm đặc hơn. (Hãy xem Hình 33.) Bạn có thể chứng minh điều này không? Tuy vậy, các thí nghiệm đều cho ta thấy rằng ánh sáng trong các môi trường vật chất đậm đặc hơn sẽ chuyển động *chậm hơn*. Quan niệm sóng sẽ giải thích điều này một cách dễ dàng. (Bạn có thể chứng minh điều này không?) Về mặt lịch sử, đây là một trong những luận chứng *chống lại* thuyết hạt ánh sáng. Trái lại, mô hình mũi tên của ánh sáng mà ta trình bày ở trên có thể giải thích đúng hiện tượng khúc xạ. Điều này không khó: bạn hãy thử làm xem.

Câu đố 40 e
Câu đố 41 e
Câu đố 42 e

Sóng cũng *phản xạ một phần* từ các chất như thuỷ tinh. Đây là một trong những tính chất sóng rất khó để giải thích khi sử dụng photon. Nhưng nó là một trong vài hiệu ứng mà ta *không thể* giải thích bằng thuyết sóng ánh sáng cổ điển. Tuy vậy, ta *có thể* giải thích bằng mô hình mũi tên, như ta sẽ thấy sau đây. Sự phản xạ một phần chứng minh cho hai quy luật đầu của mô hình mũi tên. Sự phản xạ một phần chứng tỏ rằng photon thực sự hành xử *một cách ngẫu nhiên*: một số bị phản xạ, một số khác thì không và không có một tiêu chuẩn lọc lựa nào. Sự phân biệt chỉ thuần tuý có tính thống kê.

Trang 59

Từ photon tới sóng

Trong các sóng, các trường *dao động trong thời gian và không gian*. Có một phương pháp để chỉ ra cách mà các hạt tạo ra sóng là chỉ ra cách dùng một số lớn các photon để tạo ra sóng hình sin. Một sóng hình sin là một trạng thái điều hợp của ánh sáng. Cách tạo dựng chúng được Roy Glauber giải thích rất chi tiết. Thực ra để tạo ra một sóng hình sin thuần tuý, ta cần chồng chập một chùm ánh sáng với 1 photon, một chùm ánh sáng với 2 photon, với 3 photon v.v... Tổng hợp lại chúng sẽ cho ta một sóng hình sin hoàn hảo. Đúng như ta mong đợi, số photon thăng giáng với mức độ cao nhất.

Xem 30

Nếu ta lặp lại các tính toán đối với các chùm ánh sáng không lý tưởng, ta sẽ thấy rằng hệ thức bất định đối với năng lượng và thời gian được tôn trọng: mỗi chùm ánh sáng phát ra sẽ có một bề rộng phổ nào đó. Sẽ không có ánh sáng đơn sắc thuần tuý. Tương tự như vậy, không có một hệ nào phát ra một sóng *một cách ngẫu nhiên* mà lại là sóng đơn sắc. Mọi thí nghiệm đều khẳng định điều này.

Thêm nữa, các sóng có thể *bị phân cực*. Cho đến bây giờ, ta đã bỏ qua tính chất này. Theo quan niệm photon, sự phân cực là kết quả của sự chồng chập của các chùm photon quay tròn theo hai chiều ngược nhau. Thật vậy, ta đã biết sự phân cực thẳng có thể xem như là kết quả của sự chồng chập hai ánh sáng phân cực tròn ngược dấu, cùng phase. Điều được xem như kỳ lạ trong quang học cổ điển hoá ra lại là một minh chứng cơ bản cho Thuyết lượng tử.

Sau cùng, ta *không thể phân biệt* các photon. Khi 2 photon có cùng màu đi ngang qua nhau, thì sau đó ta không có cách nào để phân biệt 2 photon này. Lượng tử tác dụng đã ngăn chặn điều đó. Tính không phân biệt được của photon cho ta một hệ quả thú vị. Đó là ta không thể chỉ được photon bay ra là đối tượng nào trong các photon bay đến. Nói cách khác, không có cách theo dõi đường đi của một photon, như cách ta đã sử dụng để

Trang 53
Xem 31
Trang 113

theo dõi đường đi của một quả billiard. Ta không thể phân biệt được các photon. Hơn nữa, thí nghiệm của Hanbury Brown và Twiss đã cho ta thấy rằng photon là các boson. Sau này ta sẽ khám phá ra thêm nhiều điều về tính không thể phân biệt đặc trưng của boson.

Tóm lại, ta thấy rằng thật ra sóng ánh sáng *có thể* được mô tả bằng các hạt. Tuy vậy, điều này chỉ đúng với điều kiện *photon*

— không thể đếm được một cách chính xác – không bao giờ có độ chính xác lớn hơn $\sqrt{N}$,
— không thể định vị được – không bao giờ có độ chính xác lớn hơn độ dài điều hợp,
— không có kích thước, điện tích và khối lượng (nghỉ),
— có độ thay đổi phase bằng ωt, tức là bằng tần số x thời gian,
— có spin = 1,
— là các boson không thể phân biệt được, có cùng tần số – trong một thể tích điều hợp,
— có thể đi theo mọi con đường – miễn là phù hợp với các điều kiện biên,
— không có nguồn gốc có thể cảm nhận được, và
— có xác suất tìm thấy bằng bình phương của tổng các biên độ* đối với mọi con đường khả hữu dẫn tới điểm phát hiện.

Nói cách khác, ta có thể mô tả ánh sáng có cấu tạo hạt *chỉ* khi các hạt này có các tính chất *lượng tử* đặc biệt. Những tính chất lượng tử này khác với tính chất của các hạt thông thường và cho phép photon hành xử như sóng khi chúng xuất hiện với một số lượng lớn.

Ánh sáng có thể chuyển động nhanh hơn ánh sáng không? – Photon thực và ảo

Trong chân không, ánh sáng có thể chuyển động nhanh hơn c cũng như chậm hơn c. Khi nguyên lý lượng tử được tuân thủ, tốc độ của một chớp sáng ngắn có thể thay đổi – mặc dù thay đổi rất ít – so với giá trị 'chính thức'. Bạn có thể ước tính độ sai biệt có thể chấp nhận được trong thời gian tới, đối với một chớp sáng đi từ thuở ban sơ hay không?

Câu đố 43 ny

Mô hình mũi tên của photon cũng cho cùng kết quả. Nếu ta tính đến khả năng khác thường là photon có thể chuyển động với tốc độ bất kỳ, ta sẽ thấy rằng mọi tốc độ khác nhiều với c đều bị loại bỏ. Sự khác biệt duy nhất còn lại, được đổi ra khoảng cách, là độ bất định, khoảng một bước sóng theo hướng dọc, mà ta đã đề cập ở trên.

Câu đố 44 ny

Tóm lại, ánh sáng, hay photon thực, thực ra có thể chuyển động nhanh hơn ánh sáng, mặc dù chỉ vào khoảng một lượng tử tác dụng. Đối với các trường hợp thông thường, tức là với các tác dụng có giá trị lớn, mọi hiệu ứng lượng tử đều biến mất, bao gồm vận tốc của ánh sáng và của photon khác với c.

Xem 32

Không chỉ vị trí mà năng lượng của một photon cũng có thể không xác định. Thí dụ, một số chất có thể tách 1 photon có năng lượng $\hbar\omega$ thành 2 photon, có năng lượng khi cộng lại thì thành photon ban đầu. Cơ học lượng tử hàm ý rằng người ta chỉ có thể biết được sự phân hoạch năng lượng khi ta đo năng lượng của 1 trong 2 photon. Chỉ khi đó ta mới biết được năng lượng của photon thứ hai. Trước khi đo, cả hai photon có năng lượng không xác định. Quá trình xác định năng lượng xảy ra *tức thời*, kể cả khi photon

* Tuy vậy, biên độ của một trường photon, không thể và không nên đồng nhất với hàm sóng của một hạt có khối lượng và có spin = 1.

Trang 154
Câu đố 45 s

thứ 2 ở rất xa. Dưới đây ta sẽ giải thích nền tảng của hiện tượng này và các hiệu ứng kỳ lạ tương tự, như có hiện tượng *hình như* nhanh hơn ánh sáng. Đúng ra thì các điều quan sát được *không* bao gồm sự truyền tải năng lượng hay thông tin nhanh hơn ánh sáng.

Các hệ quả quái dị của lượng tử tác dụng xuất hiện khi ta tìm hiểu *tĩnh* điện trường, thí dụ như các trường bao quanh một hình cầu kim loại tích điện. Điều hiển nhiên là một trường như thế cũng phải được tạo thành từ các photon. Chúng chuyển động như thế nào? Hoá ra tĩnh điện trường được tạo thành từ các photon *ảo*. Photon ảo là các photon không xuất hiện dưới dạng các hạt tự do: chúng chỉ xuất hiện trong một thời gian cực ngắn rồi lại biến mất. Trong trường hợp tĩnh điện trường, chúng bị phân cực *dọc* và không mang theo năng lượng. Các photon ảo, giống như các hạt ảo khác, là 'cái bóng' của các hạt tuân theo hệ thức

$$\Delta x \Delta p \leqslant \hbar/2 \, . \tag{14}$$

Khác với hệ thức bất định thông thường, chúng tuân theo hệ thức ngược lại, diễn tả sự xuất hiện ngắn ngủi của chúng. Dù có cuộc đời riêng ngắn ngủi và người ta không thể trực tiếp phát hiện ra chúng, các hạt ảo cũng có những hiệu ứng quan trọng.

Trang 194

Thật ra thế vector A cho phép đến *4* kiểu phân cực, tương ứng với 4 toạ độ (t, x, y, z). Đối với photon mà ta thường để cập, photon tự do hay photon *thực*, sự phân cực theo t và z triệt tiêu nhau, và người ta chỉ quan sát được sự phân cực theo x và y trong các thí nghiệm thực.

Đối với các photon liên kết hay *ảo*, tình trạng sẽ khác đi. Bốn loại phân cực đều có thể xảy ra. Thật vậy, phân cực theo z và t của các photon ảo – điều không xảy ra đối với photon thực, tức là, photon tự do – có thể nói là những hòn đá tảng của *tĩnh* điện/từ trường.

Nói cách khác, tĩnh điện/từ trường là dòng liên tục của các photon ảo. Trái với photon thực, photon ảo có thể có khối lượng, hướng của spin không hướng theo phương chuyển động và động lượng ngược với hướng chuyển động. Sự trao đổi các photon ảo dẫn tới hiện tượng *hút nhau* của các vật mang điện trái dấu. Đúng ra sự xuất hiện photon ảo là điều *cần thiết* để ta có thể mô tả các tương tác điện từ. Từ đây trở đi ta chỉ bàn đến các hiệu ứng khác lạ hơn – bao gồm sự hút nhau của các vật trung hoà.

Quyển V, trang 122
Quyển II, trang 74

Trước kia ta đã thấy các photon ảo, các hạt cần có để mô tả sự va chạm của các điện tích, phải có khả năng chuyển động với tốc độ lớn hơn tốc độ ánh sáng. Ta cần điều này để bảo đảm rằng tốc độ ánh sáng vẫn còn là một giới hạn trong mọi thí nghiệm.

Tóm lại, ta cần ngẫm hiểu rằng photon ảo, trái với photon thực, không bị giới hạn bởi tốc độ ánh sáng; nhưng việc photon ảo chuyển động nhanh hơn ánh sáng chỉ có ý nghĩa *hình thức* mà thôi.

Tính bất định của điện trường

Ta đã thấy rằng lượng tử tác dụng dẫn tới tính bất định của cường độ ánh sáng. Vì ánh sáng là sóng điện từ, tính bất định này cũng bao hàm các giới hạn tương tự, riêng biệt đối với điện/từ trường tại điểm đã cho trong không gian. Bohr và Rosenfeld là những người đầu tiên rút ra kết luận này. Họ đã khởi đầu từ các tác dụng của trường trên khối

Xem 33

lượng thử m và điện tích thử q, được mô tả bởi phương trình:

$$m\boldsymbol{a} = q\,(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{b}) \; . \qquad (15)$$

Vì ta không thể đo vừa động lượng vừa vị trí của một hạt nên ta có thể suy ra độ bất định của điện trường là

Câu đố 46 ny

$$\Delta E = \frac{\hbar}{q\,\Delta x\, t} \; , \qquad (16)$$

trong đó t là thời gian đo được và Δx là độ bất định của vị trí. Như vậy mỗi giá trị của điện trường và tương tự đối với từ trường đều có một độ bất định. Trạng thái của điện từ trường giống như trạng thái của vật chất ở chỗ: cả hai đều tuân theo một hệ thức bất định.

Hai photon có thể giao thoa với nhau không?

Trang 61

Năm 1930, Paul Dirac đã phát biểu một câu nổi tiếng mà ta đã để cập trước kia:

▷ Mỗi photon chỉ giao thoa với chính nó mà thôi. Sự giao thoa giữa 2 photon khác nhau không bao giờ xảy ra.

Xem 29

Phát biểu này thường bị diễn dịch sai thành ánh sáng từ hai *nguồn* photon tách biệt không thể giao thoa với nhau. Điều không may là sự diễn dịch sai lầm này đã lan ra trong nhiều sách vở. Các bạn có thể kiểm tra điều này không đúng đối với sóng vô tuyến: tín hiệu từ 2 trạm vô tuyến ở xa nhau, truyền đi với cùng tần số sẽ dẫn tới hiện tượng phách trong biên độ, tức là *hiện tượng giao thoa sóng*. (Không nên nhầm với hiện tượng *giao thoa sóng vô tuyến* hay gặp hơn và đó chỉ đơn giản là sự chồng chập của cường độ.) Máy phát vô tuyến là các nguồn photon điều hợp và bất kỳ máy thu sóng vô tuyến nào cũng có thể chứng tỏ rằng các tín hiệu tạo nên hai nguồn khác nhau đều có thể giao thoa với nhau.

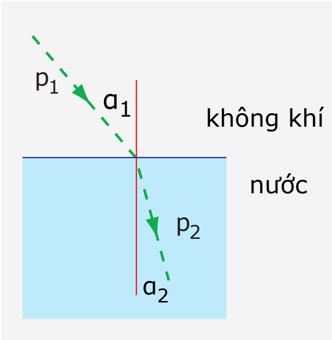
Xem 34

Năm 1949, sự giao thoa của các trường phát ra từ 2 nguồn photon khác nhau cũng đã được chứng minh với các chùm *vi ba*. Từ 1950 trở đi, nhiều thí nghiệm với 2 laser và thậm chí với 2 nguồn bức xạ nhiệt đã cho thấy sự giao thoa của ánh sáng. Thí dụ như trong năm 1963, Magyar và Mandel đã sử dụng 2 laser hồng ngọc phát ra các xung ánh sáng và một máy ảnh có cửa trập nhanh để tạo ra các vân giao thoa trong không gian.

Xem 35

Tuy vậy, tất cả các thí nghiệm giao thoa với 2 nguồn không mâu thuẫn với phát biểu của Dirac. Thật vậy, hai photon không thể giao thoa vì nhiều lý do.

— Giao thoa là kết quả của sự truyền sóng trong không-thời gian; photon chỉ xuất hiện khi người ta sử dụng mô hình năng–động lượng, chủ yếu là khi tương tác với vật chất xảy ra. Việc mô tả sự lan truyền trong không-thời gian và mô hình hạt loại trừ nhau – đây là một mặt của nguyên lý bổ túc. Tại sao Dirac hình như trộn hai điều này trong phát biểu của mình? Dirac sử dụng thuật ngữ 'photon' với nghĩa tổng quát, là trạng thái lượng tử hoá của trường điện từ. Khi hai chùm ánh sáng điều hợp chồng chập, ta không biết phải gán các thực thể lượng tử hoá, tức photon, cho nguồn nào trong hai nguồn đó. Giao thoa là kết quả của sự chồng chập của 2 trạng thái điều hợp chứ



HÌNH 34 Sự khúc xạ và photon.

không phải của 2 hạt.

— Chỉ có thể xảy ra giao thoa nếu người ta *không thể biết* photon đến từ nguồn nào. Việc cơ học lượng tử mô tả trường trong hiện tượng giao thoa không cho phép ta gán các photon của trường chồng chập cho một trong 2 nguồn. Nói cách khác, ta *không thể* quan sát được hiện tượng giao thoa nếu ta có thể chỉ ra photon đến từ nguồn nào.
— Sự giao thoa giữa 2 chùm ánh sáng điều hợp đòi hỏi có sự tương quan hay có độ lệch không đổi giữa 2 phase của 2 chùm ánh sáng, tức là, số hạt không xác định; nói cách khác, giao thoa chỉ có thể xảy ra nếu và chỉ nếu ta không biết số photon của mỗi chùm ánh sáng. Và một chùm ánh sáng có số photon không xác định khi độ bất định có độ lớn cỡ số photon trung bình.

Như vậy phát biểu của Dirac phụ thuộc vào định nghĩa của từ 'photon'. Có một cách lựa chọn từ ngữ tốt hơn, là nói rằng giao thoa luôn xảy ra giữa hai lịch sử (không thể phân biệt được) và không bao giờ xảy ra giữa hai hạt lượng tử. Hay như đã phát biểu ở trên:

▷ Một photon chỉ giao thoa *trong phạm vi* thể tích điều hợp của nó, tức là, trong ô không gian phase riêng của nó. Ngoài ra, sẽ không có giao thoa. Và trong thể tích hay ô đó, ta không thể phân biệt các photon, trạng thái hay lịch sử.

Ngày nay khái niệm 'photon' vẫn còn bí ẩn và mô hình hạt lượng tử của sự điều hợp và ánh sáng vẫn còn nhiều điều mê hoặc. Tóm lại, *Hai chùm sóng điện từ có thể giao thoa nhưng hai photon khác nhau thì không thể.*

Các câu đố vui và lạ về photon

Người ta có thể giải thích hiện tượng khúc xạ bằng photon không? Newton đã không thể làm được nhưng ngày nay thì ta có thể. Trong sự khúc xạ bởi một mặt phẳng nằm ngang như trong Hình 34, tình trạng sẽ không thay đổi khi ta tĩnh tiến theo phương ngang. Do đó, thành phần động lượng dọc theo phương này được bảo toàn: $p_1 \sin\alpha_1 = p_2 \sin\alpha_2$. Năng lượng photon $E = E_1 = E_2$ hiển nhiên được bảo toàn. Chiết suất n được tính theo động lượng và năng lượng là

$$n = \frac{cp}{E} \ . \qquad (17)$$

Câu đố 47 e

'Định luật' khúc xạ tuân theo hệ thức:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = n\,. \tag{18}$$

Hệ thức này đã được biết từ thời trung cổ.

Ở đây có một vấn đề quan trọng. Trong một chất, vận tốc của một photon $v = \delta E/\delta p$ trong một tia sáng *thì khác* với vận tốc phase $u = E/p$ trong tính toán. Tóm lại, trong vật chất, khái niệm photon phải được sử dụng hết sức cẩn thận.

* *

Nếu một sóng điện từ có biên độ A, mật độ photon d là

$$d = \frac{A^2}{\hbar\omega}\,. \tag{19}$$

Câu đố 48 ny

Bạn có thể chứng minh công thức này không?

* *

Hãy chứng tỏ rằng đối với một xung laser trong chân không, thể tích điều hợp tăng lên lúc xung lan truyền, trong khi thể tích trong không gian phase vẫn không đổi. Entropy của nó không đổi, vì đường đi của nó có tính thuận nghịch.

Câu đố 49 e

* *

Một hiệu ứng điển hình của các 'định luật' là màu vàng của các đèn chiếu sáng đường phố trong phần lớn các đô thị. Chúng phát ra ánh sáng vàng thuần tuý (gần như) có cùng tần số; đó là lý do ta không thể phân biệt được các màu khác trong ánh sáng của chúng. Theo Điện động lực học cổ điển, các hoạ ba của tần số ánh sáng đó cũng được phát ra. Tuy vậy thí nghiệm cho ta thấy điều này không xảy ra; như vậy Điện động lực học cổ điển sai. Lập luận này có đúng không?

Câu đố 50 s

* *

Làm cách nào bạn có thể kiểm tra được là bom kích khởi bằng photon đơn lẻ hoạt động được mà không cần làm cho nó nổ? Câu đố nổi tiếng này của Avshalom Elitzur và Lev Vaidman, cần dùng đến sự giao thoa để giải. Bạn có thể tìm ra một cách giải không?

Câu đố 51 ny

* *

Điều gì sẽ xảy ra khi photon chạm vào một vật mà không bị hấp thu hay phát xạ? Nói một cách tổng quát, chúng bị tán xạ. *Tán xạ* là quá trình làm thay đổi chuyển động của ánh sáng (hay bất kỳ sóng nào khác). Quá trình tán xạ phụ thuộc vào vật; một số quá trình tán xạ chỉ làm thay đổi hướng chuyển động, quá trình khác làm thay đổi tần số. Bảng 3 cho ta một tổng quan về các quá trình tán xạ ánh sáng.

Mọi tính chất tán xạ phụ thuộc vào chất tạo ra sự lệch hướng của ánh sáng. Cùng với nhiều kiến thức khác, việc nghiên cứu quá trình tán xạ giải thích được màu sắc của các chất trong suốt như ta sẽ thấy dưới đây.

Trang 172

Ta nên chú ý rằng việc uốn cong tia sáng do lực hấp dẫn không được gọi là sự tán xạ.



HÌNH 35 Bầu trời xanh và màu của các đám mây là do độ tán xạ Rayleigh, Mie và Tyndall khác nhau (© Giorgio di Iorio).

Câu đố 52 e Tại sao lại không gọi như vậy?

Tóm tắt về ánh sáng: hạt và sóng

Tóm lại, ánh sáng là dòng các lượng tử ánh sáng hay photon. Một photon riêng lẻ là cường độ ánh sáng khả hữu nhỏ nhất của màu đã cho. Photon, giống như tất cả các quanton, hoàn toàn khác các hạt thông thường. Đúng ra ta có thể cho rằng các tính chất hạt (cổ điển) của photon là năng lượng, động lượng và spin, được lượng tử hoá. Còn các mặt khác, photon *không* giống các viên đá nhỏ. Photon chuyển động với tốc độ ánh sáng. Photon không định xứ trong các chùm ánh sáng. Ta không thể phân biệt các photon. Photon là các boson. Photon không có khối lượng, điện tích và kích thước. Nói rằng *photon là các công cụ tính toán dùng để mô tả chính xác các hiện tượng ánh sáng* thì chính xác hơn. Xem 36

Các tính chất kỳ lạ của photon là lý do tại sao những nỗ lực mô tả ánh sáng là các dòng hạt (cổ điển) trước kia, thí dụ như nỗ lực của Newton, đều thất bại một cách đáng thương, chưa kể còn bị các khoa học gia khác nhạo báng. Thật vậy, Newton bảo vệ lý thuyết của mình chống lại mọi bằng chứng thực nghiệm – đặc biệt đối với tính chất sóng của ánh sáng – là điều mà một vật lý gia sẽ không bao giờ làm. Chỉ sau khi mọi người đã chấp nhận ánh sáng là sóng rồi khám phá và hiểu rằng các hạt lượng tử cơ bản khác với các hạt cổ điển thì sự mô tả quanton mới thành công.

Lượng tử tác dụng hàm ý rằng *mọi sóng đều là các dòng quanton*. Đúng ra mọi sóng đều có *mối tương quan* với các dòng quanton. Điều này đúng đối với ánh sáng, các dạng bức xạ khác và mọi dạng sóng vật chất.

Hệ thức bất định cho ta thấy rằng ngay cả một quanton riêng lẻ cũng có thể được xem là một sóng; tuy vậy, khi nó tương tác với phần còn lại của thế giới thì nó lại hành xử như một hạt. Đúng ra điều *cốt yếu* ở đây là mọi sóng đều được cấu tạo từ các quanton:

BẢNG 3 Các loại tán xạ ánh sáng.

Loại tán xạ	Vật tán xạ	Chi tiết	Thí dụ
Tán xạ Rayleigh	nguyên/phân tử	đàn hồi, cường độ thay đổi tỷ lệ với $1/\lambda^4$, vật tán xạ nhỏ hơn $\lambda/10$	bầu trời xanh, trời chiều đỏ, khói thuốc xanh
Tán xạ Mie	vật trong suốt, các giọt chất lỏng nhỏ	đàn hồi, cường độ thay đổi tỷ lệ với $1/\lambda^{0.5}$ tới $1/\lambda^2$, kích thước vật tán xạ cỡ λ	bầu trời xanh, trời chiều đỏ, núi xa màu xanh
Tán xạ hình học	bờ, cạnh	đàn hồi, kích thước vật tán xạ lớn hơn λ	nên gọi là *nhiễu xạ*, được sử dụng trong giao thoa
Tán xạ Tyndall	vật không trong suốt	đàn hồi, góc tán xạ không phụ thuộc/phụ thuộc yếu vào bước sóng	sương khói, mây trắng, sương mù, khói thuốc trắng
Tán xạ Smekal–Raman	nguyên tử/phân tử bị kích thích	không đàn hồi, ánh sáng kiếm được năng lượng	được sử dụng trong việc nghiên cứu khí quyển bằng lidar
Tán xạ Raman ngược	nguyên/phân tử	không đàn hồi, ánh sáng mất năng lượng	được sử dụng trong việc nghiên cứu vật liệu
Tán xạ Thomson	electron	đàn hồi	được sử dụng trong việc xác định mật độ electron
Tán xạ Compton	electron	không đàn hồi, tia X mất năng lượng	chứng minh tính chất hạt của ánh sáng (xem Trang 47)
Tán xạ Brillouin	phonon âm, sự thay đổi mật độ trong chất rắn/chất lỏng	không đàn hồi, độ dịch chuyển tần số khoảng vài GHz	được sử dụng để nghiên cứu phonon và kiểm tra cáp quang
Tán xạ Von Laue hay tán xạ tia X	tinh thể rắn	đàn hồi, do sự giao thoa tại các mặt tinh thể	được sử dụng để xác định cấu trúc tinh thể; còn gọi là *nhiễu xạ Bragg*

nếu không thì sự tương tác sẽ không có tính địa phương và ta không thể định vị các vật, trái với kinh nghiệm của chúng ta.

Để quyết định xem mô tả kiểu sóng hay kiểu hạt thích hợp hơn, ta có thể sử dụng tiêu chuẩn sau đây. Khi vật chất và ánh sáng tương tác, việc mô tả bức xạ điện từ như là

một sóng sẽ thích hợp hơn nếu bước sóng λ thoả điều kiện

$$\lambda \gg \frac{\hbar c}{kT} , \tag{20}$$

trong đó $k = 1.4 \cdot 10^{-23}$ J/K là hằng số Boltzmann và T là nhiệt độ của hạt. Nếu bước sóng *nhỏ hơn* đại lượng bên vế phải rất nhiều thì mô tả theo kiểu hạt là thích hợp nhất. Nếu 2 bên có cùng độ lớn, cả hai cách mô tả đều dùng được. Bạn có thể giải thích rõ tiêu chuẩn này không?

Câu đố 53 e

Chương 3

Chuyển động của vật chất – ngoài phạm vi của vật lý cổ điển

> "Mọi điều vĩ đại đều bắt đầu như những điều báng bổ."
>
> George Bernard Shaw

Sự hiện hữu của tác dụng cực tiểu có nhiều hệ quả quan trọng đối với chuyển động của vật chất. Ta sẽ bắt đầu với một số kết quả thực nghiệm chứng tỏ rằng lượng tử tác dụng thực ra là tác dụng cực tiểu có thể đo được trong trường hợp của vật chất. Chúng sẽ dẫn tới sự hiện hữu của phase và các tính chất sóng của vật chất. Sau cùng, ta có thể mô tả chuyển động của vật chất như ta đã mô tả ánh sáng: các hạt vật chất hành xử như các mũi tên quay.

Những ly rượu vang, viết chì và nguyên tử – không có sự đứng yên

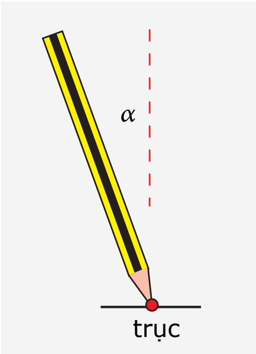
> "Otium cum dignitate.**"
>
> Cicero, *De oratore*.

Nếu lượng tử tác dụng là sự thay đổi nhỏ nhất mà ta có thể quan sát được trong một hệ vật lý, thì hai quan sát trong cùng một hệ thống phải luôn luôn khác nhau. Như vậy không thể có sự đứng yên hoàn toàn trong thiên nhiên. Điều đó có đúng không? Thực nghiệm chứng tỏ rằng điều này đúng.

Một hệ quả đơn giản của việc không có sự đứng yên hoàn toàn là ta không thể rót đầy một ly rượu vang. Nếu ta gọi một ly có dung tích cực đại (bao gồm cả hiệu ứng căng mặt ngoài, để cho lý luận được chính xác) là 'đầy', thì ta thấy ngay rằng trạng thái này đòi hỏi mặt chất lỏng hoàn toàn không chuyển động. Ta không bao giờ thấy điều này. Thật vậy, một mặt hoàn toàn yên tĩnh phải có hai trạng thái liên tiếp khác nhau nhỏ hơn $\hbar$. Ta có thể cố gắng giảm thiểu mọi chuyển động bằng cách giảm nhiệt độ của hệ. Để đạt đến sự đứng yên tuyệt đối ta cần đạt đến độ 0 tuyệt đối. Thí nghiệm chứng tỏ rằng điều này không thể xảy ra. (Thật vậy, điều bất khả này, được gọi là *'Nguyên lý' thứ 3 của nhiệt động lực học*, tương đương với sự hiện hữu của tác dụng cực tiểu.) Mọi thí nghiệm đều chứng tỏ rằng: *Không có sự đứng yên trong thiên nhiên.* Nói cách khác, lượng tử tác dụng chứng thực một chân lý cổ xưa là một ly rượu vang luôn luôn trống một phần *và* đầy một phần.

Điều mà lượng tử tác dụng đã tiên đoán là không có sự đứng yên vi mô, đã được nhiều thí nghiệm khẳng định. Thí dụ như một cây viết chì đang đứng trên đầu của nó *không thể* đứng thẳng như ta đã thấy trong Hình 36, mặc dù nó được cô lập tách rời

** 'Sự thư nhàn xứng đáng.'



HÌNH 36 Một cây viết chì đang rơi.

mọi tác động khác như sự dao động, chuyển động nhiệt và chuyển động của các phân tử không khí. Kết luận này – phải thừa nhận là thiếu thực tế – được suy ra từ hệ thức bất định. Đúng ra ta có thể tính được thời gian mà sau đó thì viết chì *phải* đổ. Tuy vậy trong thực tế viết chì đổ nhanh hơn nhiều vì trong điều kiện thông thường, các nhiễu loạn bên ngoài lớn hơn tác động của lượng tử tác dụng khá nhiều.

Câu đố 54 d

Nhưng hệ quả quan trọng nhất của việc không có sự đứng yên lại là một chuyện khác. Việc electron trong nguyên tử không đứng yên giúp cho chúng không rơi vào hạt nhân, mặc dù có lực hút hỗ tương. Nói cách khác, sự tồn tại và kích thước của các nguyên tử, của tất cả vật chất, là hệ quả trực tiếp của việc không có sự đứng yên vi mô! Dưới đây ta sẽ tìm hiểu điều này chi tiết hơn. Vì chúng ta được tạo thành từ các nguyên tử nên ta có thể nói: ta chỉ có thể tồn tại nhờ lượng tử tác dụng.

Trang 80

Không có phép đo có độ chính xác vô hạn

Lượng tử tác dụng không chỉ ngăn chặn sự đứng yên mà còn ngăn chặn sự hiện hữu của nó; lượng tử tác dụng cũng ngăn chặn việc quan sát hay đo đạc sự đứng yên. Để kiểm tra xem một vật có đứng yên hay không, ta cần quan sát vị trí của nó một cách chính xác. Vì ánh sáng có tính chất sóng, ta cần một photon có năng lượng lớn: chỉ photon có bước sóng nhỏ mới cho phép ta đo vị trí một cách chính xác. Tuy vậy, do năng lượng lớn, vật sẽ bị nhiễu loạn. Tệ hơn nữa là ta không thể đo sự nhiễu loạn một cách chính xác; vì vậy không thể xác định vị trí nguyên thuỷ của vật ngay cả khi ta đã tính đến nhiễu loạn. Tóm lại, ta không thể quan sát được sự đứng yên hoàn toàn – cho dù nó có hiện hữu đi chăng nữa.

Thật vậy, mọi thí nghiệm trong đó các hệ đã được quan sát với độ chính xác cao nhất đều khẳng định rằng không có sự đứng yên hoàn toàn. Việc không có sự đứng yên đã được khẳng định đối với electron, neutron, proton, ion, nguyên tử, phân tử, các thể ngưng tụ nguyên tử và tinh thể. Điều này cũng đã được khẳng định đối với vật có khối lượng khoảng 1 tấn và đã được sử dụng trong các máy phát hiện sóng hấp dẫn. Chưa từng có vật đứng yên.

Lý luận tương tự về giới hạn của phép đo cũng đã cho ta thấy rằng không có phép đo các biến động lực bất kỳ, có thể thực hiện với độ chính xác lớn vô hạn. Đây là một trong các hệ quả có tầm ảnh hưởng rộng của 'lượng tử tác dụng'.

Hơi lạnh

Lượng tử tác dụng hàm ý rằng không có sự đứng yên trong thiên nhiên. Đúng ra ngay ở nhiệt độ cực thấp, mọi hạt bên trong vật chất vẫn chuyển động. Hiện tượng cơ bản này được cho là do *các thăng giáng ở điểm không*. Một thí dụ điển hình mà người ta kiếm được là từ các thí nghiệm về các thể ngưng tụ Bose–Einstein. Chúng là một số lượng nhỏ các nguyên tử hơi (từ 10 tới vài triệu), bị bẫy lại và được làm lạnh tới nhiệt độ cực thấp (khoảng 1 nK). Các bẫy cho phép giữ các nguyên tử lơ lửng trong chân không. Người ta có thể quan sát hơi lạnh và bị bẫy này với độ chính xác cao. Sử dụng các kỹ thuật thí nghiệm phức tạp, người ta có thể đưa thể ngưng tụ Bose–Einstein vào các trạng thái mà $\Delta p \Delta x$ gần bằng với $\hbar/2$ – mặc dù không bao giờ thấp hơn giá trị này. Những thí nghiệm này khẳng định trực tiếp rằng không thể có sự đứng yên tuyệt đối mà có một *độ mờ* cơ bản trong thiên nhiên. Và độ mờ đó được mô tả bằng lượng tử tác dụng.

Điều này dẫn tới một câu đố thú vị. Trong một vật bình thường, khoảng cách giữa các nguyên tử lớn hơn bước sóng de Broglie rất nhiều. (Bạn có thể chứng minh điều này không?) Câu đố 55 s Nhưng ngày nay người ta có thể làm lạnh các vật tới nhiệt độ cực thấp. Ở nhiệt độ đủ thấp, nhỏ hơn 1 nK, bước sóng của các nguyên tử có thể lớn hơn khoảng cách giữa chúng. Xem 37 Bạn có thể tưởng tượng được điều gì sẽ xảy ra trong những trường hợp đó không? Câu đố 56 s

Dòng chảy và sự lượng tử hoá của vật chất

> “Die Bewegung ist die Daseinsform der Materie.”
> Friedrich Engels, *Chống-Dühring*.*

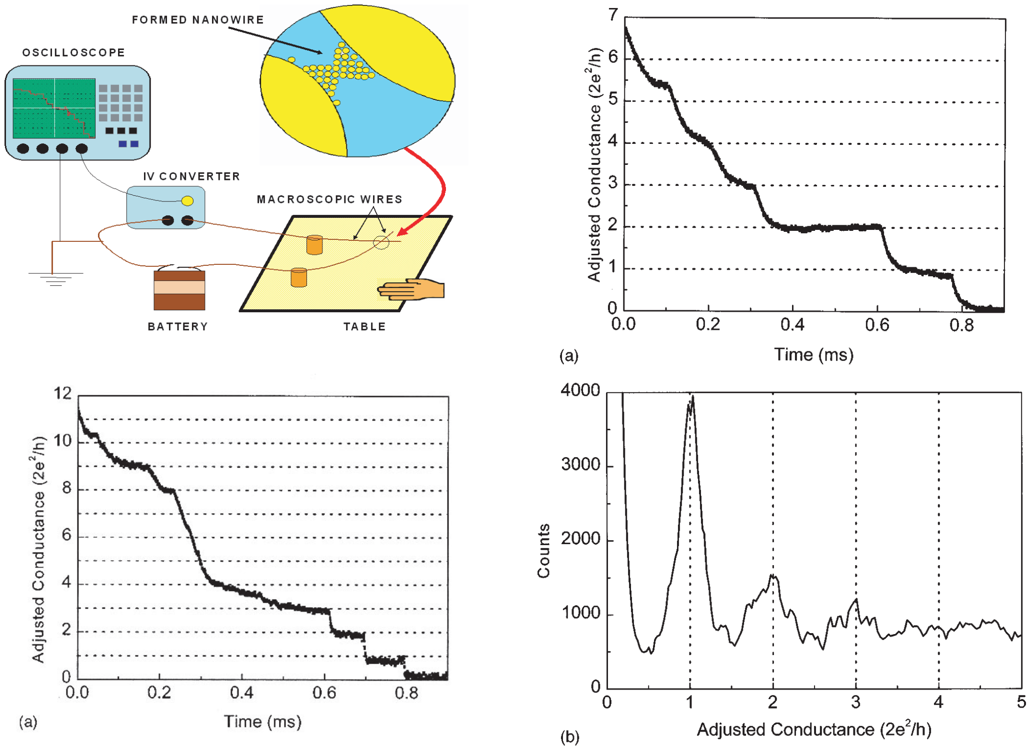
Lượng tử tác dụng không chỉ làm cho không thể có sự đứng yên mà nó còn làm cho thời gian phải thay đổi. Thí dụ quan trọng nhất về trạng thái dừng (biểu kiến) là các *dòng chảy*. Lượng tử tác dụng cho kết quả là *không có* dòng chảy dừng. Nói chính xác hơn, một tác dụng cực tiểu hàm ý rằng không có dòng chảy liên tục. *Mọi dòng chảy đều thăng giáng*. Trong thiên nhiên, mọi dòng chảy đều được tạo thành từ các thực thể nhỏ nhất: các hạt lượng tử. Ta đã thấy điều này đúng trong trường hợp ánh sáng; nó cũng đúng cho các dòng vật chất. Hai loại dòng đơn giản từ kinh nghiệm thông thường của chúng ta khẳng định trực tiếp hệ quả có được từ lượng tử tác dụng: các dòng lưu chất và dòng điện.

Dòng lưu chất và quanton

Dòng vật chất cũng bộc lộ tính hạt. Như ta đã đề cập trước kia trong cuộc thám hiểm, Quyển I, trang 391 một hệ quả của cấu trúc hạt của chất lỏng như dầu hay các chất lỏng trơn mịn khác đều tạo ra *tiếng ồn* ngay cả khi nó chảy xuyên qua các ống trơn láng nhất. Ta đã nói rằng tiếng ồn mà ta nghe được trong tai trong tình trạng yên lặng tuyệt đối – thí dụ như trong một vùng đất không có gió và ngập tuyết hay trong một căn phòng không có tiếng vang – một phần là do tính chất hạt của dòng máu chảy trong mạch máu. Mọi thí nghiệm đều khẳng định rằng mọi dòng vật chất đều sinh ra dao động. Đây là hệ quả của lượng tử tác dụng và tính chất hạt của vật chất. Thật ra ta có thể xác định được lượng tử tác dụng từ các phép đo tiếng ồn trong lưu chất.

Xem 12

* ‘Chuyển động là cách tồn tại của vật chất.’



HÌNH 37 Các bậc thang của dòng điện trong dây dẫn kim loại đặt chéo nhau: dụng cụ, các phần tử dẫn nano là nền tảng của hiệu ứng và 3 kết quả đo được (© José Costa-Krämer, AAPT từ Xem 39).

Gõ bàn và điện dẫn suất lượng tử hoá

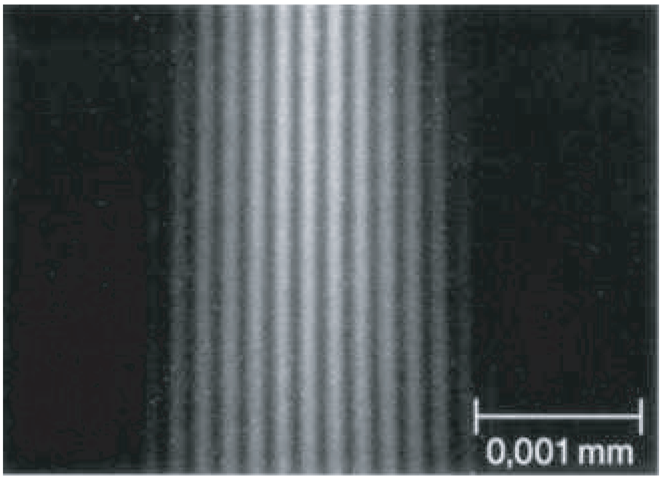
Xem 38, Xem 39

Nếu dòng điện là một dòng liên tục ta có thể quan sát được tác dụng nhỏ tuỳ ý. Phản thí dụ đơn giản nhất được José Costa-Krämer và các cộng sự của ông khám phá năm 1996. Họ đặt 2 dây kim loại chồng lên nhau trên một bàn bếp rồi gắn thêm một cục pin, một máy biến đổi hiệu thế-dòng – hay đơn giản là một điện trở – và gắn với một dao động nghiệm. Sau đó họ đo được dòng điện trong khi *gõ* lên bàn. Tất cả chỉ có vậy.

Việc gõ bàn phá vỡ sự tiếp xúc giữa 2 dây dẫn. Trong millisecond cuối trước khi 2 dây rời ra, điện dẫn suất và do đó dòng điện giảm đi theo những bậc đều đặn khoảng 7 µA, như ta dễ dàng thấy trên dao động nghiệm. Hình 37 cho thấy một phép đo như vậy. Thí nghiệm đơn giản này, nếu được tiến hành trước đó vài năm, có thể đã đánh bại một số các thí nghiệm cực đắt cũng đã khám phá ra sự lượng tử hoá này với giá nhiều triệu euro, bằng cách sử dụng các bộ dụng cụ phức tạp ở nhiệt độ cực thấp.

Đúng ra sự lượng tử hoá điện dẫn suất đều xuất hiện trong các mối tiếp xúc điện có thiết diện ngang nhỏ. Trong các trường hợp như vậy lượng tử tác dụng cho ta kết quả là điện dẫn suất chỉ có thể là một bội của $2e^2/\hbar \approx (12\,906\,\Omega)^{-1}$. Bạn có thể chứng minh điều này không? Nên nhớ rằng điện dẫn suất có thể rất nhỏ; chỉ có điện dẫn suất *bị lượng tử hoá* là có giá trị cực tiểu là $2e^2/\hbar$.

Có nhiều thí nghiệm phức tạp hơn khẳng định việc quan sát các bậc của độ dẫn điện. Chúng buộc ta phải kết luận rằng có một *điện tích nhỏ nhất* trong thiên nhiên. Điện tích



HÌNH 38 Các chùm electron nhiễu xạ và giao thoa qua nhiều khe (© Claus Jönsson).

cực tiểu này có cùng giá trị như điện tích một electron. Thật vậy, electron hoá ra là một phần của nguyên tử, trong một kết cấu mà ta sẽ giải thích sau đây. Trong kim loại, một số lớn các electron có thể chuyển động tự do: đó là lý do kim loại dẫn điện tốt và phản xạ tốt.

Tóm lại, vật chất và điện chảy theo từng đơn vị nhỏ nhất. Tuỳ theo chất chảy, đơn vị dòng chảy nhỏ nhất của vật chất có thể là 'phân tử', 'nguyên tử', 'ion', hay 'electron'. Tất cả đều là các hạt *lượng tử* hay *quanton*. Tóm lại, lượng tử tác dụng hàm ý rằng vật chất được tạo thành từ các quanton. Quanton có cùng một số tính chất với các viên đá nhưng cũng khác với chúng ở nhiều điểm khác. Một viên đá có vị trí, động lượng, khối lượng, gia tốc, kích thước, hình dạng, cấu trúc, sự định hướng, moment động lượng và màu sắc. Đến đây ta đã tìm hiểu các tính chất của quanton và thấy sự liên hệ giữa chúng và lượng tử tác dụng.

Quanton của vật chất và chuyển động của chúng – sóng vật chất

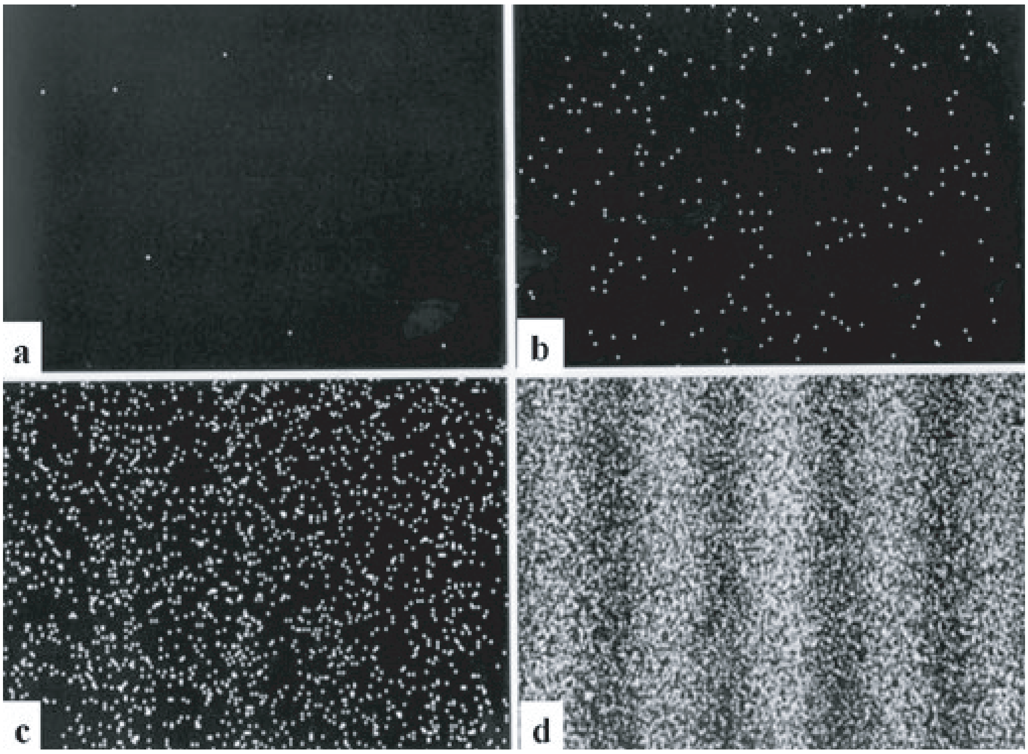
Xem 40

Năm 1923 và 1924, vật lý gia nổi tiếng Louis de Broglie đã nghiền ngẫm về các hệ quả của lượng tử tác dụng đối với hạt vật chất. Ông biết rằng trong trường hợp ánh sáng, lượng tử tác dụng kết nối tính chất sóng với tính chất hạt. Ông lý luận rằng điều tương tự cũng xảy ra cho vật chất. Ông chợt nhận ra là các dòng hạt vật chất có cùng động lượng cũng sẽ hành xử như sóng, giống như các dòng lượng tử ánh sáng. Từ đó ông tiên đoán rằng, giống như ánh sáng, các dòng vật chất điều hợp cũng sẽ có bước sóng λ và tần số góc ω được cho bởi công thức

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} \quad \text{và} \quad \omega = \frac{E}{\hbar}\,, \tag{21}$$

trong đó p và E là động lượng và năng lượng tương ứng của một hạt. Ta có thể viết lại hệ thức như sau

$$\boldsymbol{p} = \hbar\boldsymbol{k} \quad \text{và} \quad E = \hbar\omega\,. \tag{22}$$



HÌNH 39 Sự hình thành các hình giao thoa của electron có cường độ nhỏ, theo thời gian, trong thí nghiệm khe kép: (a) 8 electron, (b) 270 electron, (c) 2000 electron, (d) 6000 electron, sau 20 phút thí nghiệm. Hình sau cùng tương ứng với hình đã thấy trong phần trước. (© Tonomura Akira/Hitachi).

Các hệ thức này cho thấy quanton cũng hành xử như sóng. Đối với các vật thông thường, sóng này không thể đo được vì quá nhỏ – mặc dù không nhỏ đối với các hạt vi mô. Không lâu sau tiên đoán của de Broglie, các thí nghiệm bắt đầu khẳng định điều này. Người ta thấy các dòng vật chất nhiễu xạ, khúc xạ và giao thoa; và các điều quan sát được đều phù hợp với các giá trị đã được de Broglie tiên đoán. Vì giá trị nhỏ của bước sóng của quanton, ta cần các thí nghiệm được tiến hành một cách thận trọng để phát hiện ra các hiệu ứng này. Nhưng lần lượt, mọi kiểm chứng thực nghiệm về tính chất sóng của ánh sáng đều được lặp lại cho các chùm vật chất. Thí dụ như ánh sáng bị nhiễu xạ khi đi quanh một bờ cạnh hay đi xuyên qua một khe, thì vật chất cũng bị nhiễu xạ trong các điều kiện như vậy. Điều này đúng đối với electron, hạt đơn giản nhất của vật chất, như đã thấy trong Hình 38. Đúng ra làm thí nghiệm với electron khá khó khăn. Nó đã được Claus Jönsson thực hiện tại Tübingen năm 1961 lần đầu tiên; trong năm 2002 thí nghiệm này đã được bình chọn là thí nghiệm đẹp nhất trong vật lý. Nhiều năm sau Jönsson, thí nghiệm đã được lặp lại với một kính hiển vi điện tử có điều chỉnh như đã thấy trong Hình 39.

Xem 41

Lấy cảm hứng từ giao thoa kế ánh sáng, các nhà nghiên cứu bắt đầu tạo dựng các giao thoa kế *vật chất*. Giao thoa kế vật chất đã được sử dụng trong nhiều thí nghiệm.Ngày nay giao thoa kế vật chất hoạt động với các chùm electron, nucleon, hạt nhân, nguyên tử, hay

Quyển V, trang 142

Xem 42
Quyển III, trang 102

ngay cả các đại phân tử. Giống như các thí nghiệm về giao thoa ánh sáng chứng minh cho bản chất sóng của ánh sáng, các hình giao thoa quan sát được đối với các chùm vật chất chứng minh cho bản chất sóng của vật chất. Chúng cũng khẳng định cho giá trị của $\hbar$.

Giống như ánh sáng, vật chất có cấu tạo hạt, hành xử như sóng khi có một số lớn các hạt có cùng động lượng tham gia. Nhưng dù các chùm đại phân tử hành xử như sóng, các vật thông thường – như xe trên đường – thì không. Có nhiều lý do giải thích cho điều này. Đầu tiên, vì xe trên đường có bước sóng cực nhỏ. Thứ hai, tốc độ xe thay đổi quá nhiều. Thứ ba, xe có thể đếm được. Tóm lại, dòng các xe có cùng tốc độ không có tính điều hợp.

Nếu vật chất hành xử như sóng, ta có thể rút ra một kết luận kỳ dị. Đối với một sóng bất kỳ, vị trí và bước sóng không thể xác định một cách đồng thời: độ bất định của số sóng $k = 2\pi/\lambda$ và của vị trí X tuân theo hệ thức

$$\Delta k \Delta X \geq \frac{1}{2} . \qquad (23)$$

Tương tự như vậy, đối với mỗi sóng, tần số góc $\omega = 2\pi f$ và thời điểm biên độ cực đại T không thể xác định một cách đồng thời. Độ bất định của chúng có mối liên hệ

$$\Delta \omega \Delta T \geq \frac{1}{2} . \qquad (24)$$

Sử dụng tính chất sóng de Broglie của vật chất (22), ta kiếm được

$$\Delta p \Delta X \geqslant \frac{\hbar}{2} \qquad \text{và} \qquad \Delta E \Delta T \geqslant \frac{\hbar}{2} . \qquad (25)$$

Những hệ thức nổi tiếng này được gọi là *hệ thức bất định Heisenberg*. Chúng đã được Werner Heisenberg tìm ra năm 1925. Chúng đúng đối với tất cả các hạt lượng tử, vật chất hay bức xạ. Hệ thức bất định phát biểu rằng không thể gán, một cách đồng thời, các giá trị động lượng và vị trí chính xác cho một hệ lượng tử, và cũng không thể gán, một cách đồng thời, các giá trị năng lượng và thời gian chính xác cho hệ. Càng biết chính xác một đại lượng thì càng không biết chính xác đại lượng kia.* Kết quả là quanton vật chất – khá giống các viên đá – *luôn* có thể định vị được nhưng chỉ là gần đúng. Mặt khác, ta thấy rằng thường không thể định vị được photon.

Cả hai hệ thức bất định đều được kiểm chứng bằng thực nghiệm một cách kỹ lưỡng. Mọi thí nghiệm đều khẳng định chúng. Đúng ra mỗi thí nghiệm chứng minh vật chất hành xử như sóng là một sự khẳng định hệ thức bất định và ngược lại.

Khi 2 biến liên kết với nhau qua hệ thức bất định, ta nói chúng *bổ túc* cho nhau. Niels Bohr đã tìm hiểu một cách hệ thống mọi cặp biến khả hữu như vậy. Bạn cũng có thể tự mình làm điều đó. Bohr đã bị nguyên lý bổ túc mê hoặc mãnh liệt và sau này ông đã mở rộng nó thành một định hướng triết học. Trong một cuộc tranh luận nổi tiếng, có người đã hỏi ông đại lượng bổ túc cho sự chính xác là gì. Ông trả lời: 'sự rõ ràng'.

Câu đố 57 s

* Một cảnh sát chặn xe của Werner Heisenberg. 'Ông có biết là mình đang lái nhanh cỡ nào không?' 'Không, nhưng tôi biết chính xác mình đang ở đâu!'

Chúng ta cũng cần chú ý rằng quanton vật chất thông thường, *thực*, luôn luôn chuyển động chậm hơn ánh sáng. Do tính mờ vốn có của chuyển động lượng tử, ta không nên ngạc nhiên khi có ngoại lệ. Thật vậy, trong một số trường hợp cực kỳ đặc biệt, lượng tử tác dụng cho phép có các hạt chuyển động nhanh hơn ánh sáng – đó là các hạt *ảo* – mà ta sẽ gặp sau này.

Trang 194

Tóm lại, lượng tử tác dụng có nghĩa là quanton của vật chất không hành xử như các viên đá chất-điểm mà như sóng. Đặc biệt, giống như sóng, vị trí và động lượng của quanton không thể được xác định một cách chính xác. Các giá trị đều mờ – vị trí và động lượng không xác định. Nếu ta biết một trong 2 giá trị càng chính xác, thì giá trị kia càng không chính xác.

Khối lượng và gia tốc của quanton

Quanton, giống như các viên đá, cũng có khối lượng. Thật vậy, người ta có thể phát hiện ra sự va chạm với electron, nguyên tử hay phân tử nếu sử dụng các bộ dụng cụ đo thật nhạy. Ta cũng có thể giảm tốc hay gia tốc Quanton. Ta đã tìm hiểu một số thí nghiệm này trong phần Điện động lực học. Tuy vậy, quanton khác với sỏi. Sử dụng hệ thức bất định thời gian–năng lượng, bạn có thể suy ra được

Quyển III, trang 29

$$a \leqslant \frac{2mc^3}{\hbar} . \tag{26}$$

Câu đố 58 s
Xem 43

Như vậy quanton sẽ có một *gia tốc cực đại*.* Thật vậy, không có hạt nào có gia tốc lớn hơn giới hạn này. Đúng ra là không có hạt nào có gia tốc tại một nơi nào đó *gần với* giá trị này. Lượng tử tác dụng không cho đứng yên và cũng giới hạn luôn cả gia tốc nữa.

Tại sao các nguyên tử không phẳng? Tại sao lại có hình dạng?

Lượng tử tác dụng xác định mọi kích thước trong thiên nhiên. Đặc biệt, nó xác định mọi *hình dạng*.

Các thí nghiệm chứng tỏ rằng mọi quanton *phức hợp* như nguyên tử hay phân tử đều có cấu trúc có kích thước hữu hạn và thường có hình dạng phức tạp. Kích thước và hình dạng của mỗi quanton phức hợp bắt nguồn từ chuyển động của các thành phần tạo nên nó. Chuyển động của các thành phần lại phụ thuộc vào lượng tử tác dụng; nhưng chúng chuyển động như thế nào?

Năm 1901, Jean Perrin và một cách độc lập vào năm 1904, Nagaoka Hantaro đã giả sử rằng nguyên tử là một 'Thái dương hệ' thu nhỏ. Năm 1913, Niels Bohr đã sử dụng ý tưởng này, kết hợp với lượng tử tác dụng và nhận thấy rằng ông có thể tiên đoán được kích thước và màu sắc của nguyên tử hydrogen, hai tính chất mà đến lúc đó chưa ai hiểu được. Ngay cả Bohr cũng đã biết rằng người ta không thể hiểu hết các tính toán này vì

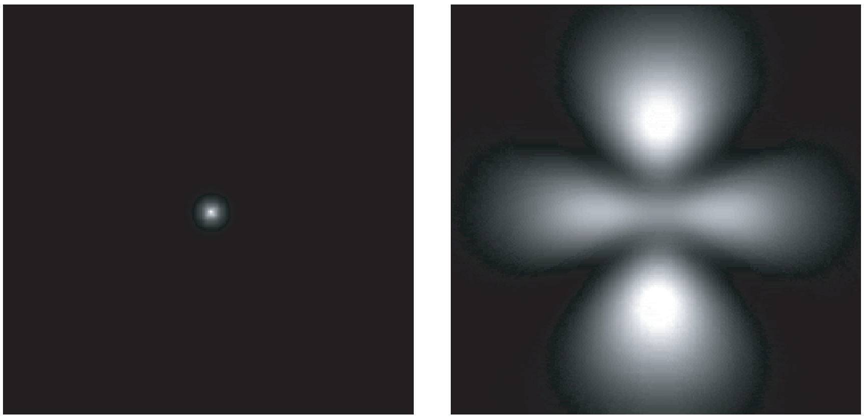
Xem 44
Xem 45

* Ta cũng nên chú ý rằng giới hạn gia tốc này khác với giới hạn gia tốc do Thuyết tương đối tổng quát:

$$a \leqslant \frac{c^4}{4Gm} . \tag{27}$$

Đặc biệt, giới hạn lượng tử (26) áp dụng cho các hạt vi mô, trong khi giới hạn tương đối tính áp dụng cho các hệ vĩ mô. Bạn có thể chứng minh là trong mỗi phạm vi thì giới hạn thích hợp sẽ là giá trị nhỏ hơn trong hai giới hạn không?

Câu đố 59 e



HÌNH 40 Các đám mây xác suất: một nguyên tử hydrogen trong trạng thái cơ bản hình cầu (hình bên trái) và trong trạng thái kích thích không hình cầu (hình bên phải) được một quan sát viên chuyển động quanh nó nhìn thấy (Film QuickTime được tạo ra bằng gói phần mềm của Dean Dauger 'Nguyên tử trong hộp', có tại trang daugerresearch.com).

Trang 182
Câu đố 60 e

họ đã giả định rằng nguyên tử hydrogen phẳng giống như Thái dương hệ. Nhưng trước tiên, nguyên tử đã được xem là hình cầu. Thứ hai, một hình phẳng sẽ mâu thuẫn với lượng tử tác dụng. Thật vậy, lượng tử tác dụng có hàm ý là chuyển động của các thành phần lượng tử có tính mờ. Do đó, mọi quanton phức hợp như nguyên tử hay phân tử phải được tạo thành từ các *đám mây* của các thành phần đó.

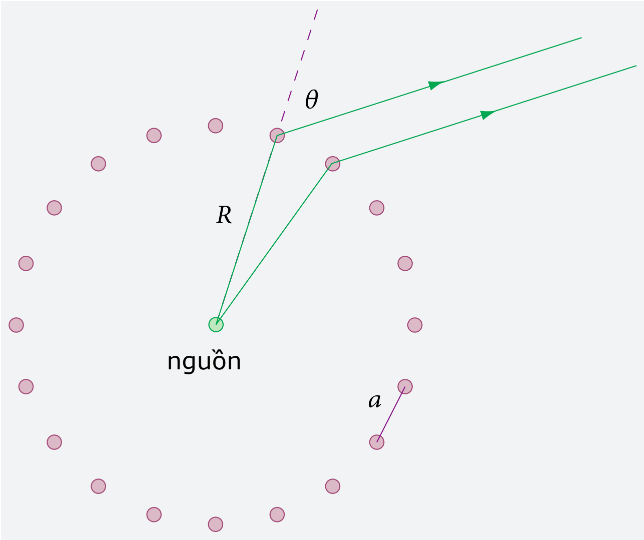
Tóm lại, lượng tử tác dụng tiên đoán rằng:

▷ Nguyên tử là các đám mây hình cầu.

Thí nghiệm và lý thuyết khẳng định rằng hình dạng của một nguyên tử bất kỳ bắt nguồn từ các đám mây hay phân bố xác suất của các thành phần nhẹ nhất của nó là electron. Như vậy theo lượng tử tác dụng thì nguyên tử hay phân tử không phải là các trái banh cứng, như Democritus hay Dalton đã tin như vậy, mà là những đám mây. *Vật chất được các đám mây tạo thành.*

Các đám mây electron của nguyên tử không cứng vô hạn mà có thể biến dạng và có một độ đâm xuyên nào đó. Nơi mà biến dạng xảy ra được gọi là một *liên kết* hoá học. Liên kết tạo nên các phân tử. Phân tử, gồm các nguyên tử được tạo thành từ các đám mây hình cầu (biến dạng). Liên kết cũng tạo ra chất lỏng, chất rắn, hoa và con người. Khi tìm hiểu chi tiết ta thấy rằng mọi hình dạng, từ phân tử đơn giản nhất tới con người, đều do sự tương tác giữa các electron và hạt nhân của các nguyên tử thành phần. Ngày nay hình dạng phân tử có thể được xác định với một độ chính xác cao. Phân tử nhỏ như nước, có hình dạng khá rắn, mặc dù có một độ đàn hồi nào đó. Các phân tử lớn, như polymer hay peptide, có hình dạng linh hoạt hơn. Sự thay đổi hình dạng này rất cần thiết cho các tác dụng của chúng trong tế bào và cho sự sinh tồn của chúng ta. Một phần lớn các công trình nghiên cứu về lý sinh và hoá sinh là công trình tìm hiểu về các tác dụng của hình dạng phân tử.

Tóm lại, lượng tử tác dụng dẫn tới sự hiện hữu của hình dạng – và sự thăng giáng



HÌNH 41 Sự lượng tử hoá moment động lượng.

của chúng. Một phân tử dài được giữ cố định ở hai đầu thì ở giữa không đứng yên. Hiện nay những thí nghiệm như vậy rất dễ thực hiện, thí dụ như với DNA. Đúng ra mọi thí nghiệm đều khẳng định là lượng tử tác dụng ngăn cản sự đứng yên, tạo ra kích thước và hình dạng đồng thời làm cho hoá học và đời sống phát triển.

Trong thiên nhiên mọi kích thước và hình dạng đều bắt nguồn từ lượng tử tác dụng. Mọi vật vĩ mô và lượng tử không có dạng hình cầu đều có thể quay. Vậy ta sẽ tìm hiểu xem lượng tử tác dụng có thể ảnh hưởng như thế nào đến chuyển động quay.

Chuyển động quay, sự lượng tử hoá moment động lượng và sự vắng mặt của Bắc cực

> “Tristo è quel discepolo che non avanza il suo maestro.”
>
> Leonardo da Vinci*

Trong đời sống hằng ngày, quay là một loại chuyển động thường xảy ra. Bánh xe ở quanh ta. Hoá ra lượng tử tác dụng có các hệ quả quan trọng dành cho chuyển động quay. Trước tiên ta nên nhớ rằng tác dụng và moment động lượng có cùng thứ nguyên: cả hai đều được đo bằng Js hay Nms. Chỉ cần suy nghĩ một chút là sẽ thấy rằng nếu vật chất hay bức xạ có động lượng và bước sóng liên hệ với nhau qua lượng tử tác dụng thì moment động lượng gắn liền với một bội của lượng tử tác dụng. Dicke và Wittke là tác giả của lý luận đẹp đẽ này.

Xem 46

Bạn hãy tưởng tượng có một hàng rào tròn, gồm N thanh thép thẳng đứng đặt cách nhau $a = 2\pi R/N$, như trong Hình 41. Tại tâm hàng rào, có một nguồn vật chất hay bức xạ có thể phát ra các hạt hướng về hàng rào theo hướng bất kỳ. Động lượng của một hạt là $p = \hbar k = 2\pi\hbar/\lambda$. Sóng sẽ giao thoa tại các khe của hàng rào. Bên ngoài hàng rào,

* ‘Buồn là việc một môn đệ không vượt qua được Thầy của mình.’ Phát biểu này trích từ một trong các cuốn sổ tay của ông, the Codice Forster III, được khắc bằng các đại tự trong giảng đường hoá học của Đại học thành phố Roma *La Sapienza*.

hướng chuyển động của hạt được xác định bằng điều kiện giao thoa dương. Nói cách khác, góc θ, mô tả hướng chuyển động bên ngoài hàng rào, được cho bởi $a \sin\theta = M\lambda$, với M là số nguyên. Qua sự đổi hướng do quá trình giao thoa, hàng rào nhận được một động lượng $p \sin\theta$, hay moment động lượng $L = pR \sin\theta$. Kết hợp các biểu thức, ta tìm được moment động lượng truyền cho hàng rào là

$$L = NM\hbar \,. \tag{28}$$

Nói cách khác, moment động lượng của hàng rào là một bội số nguyên của $\hbar$. Hàng rào chỉ có thể có moment động lượng riêng nguyên (theo đơn vị $\hbar$). Sự tổng quát hoá lý luận này cho mọi vật vẫn còn đúng. (Dĩ nhiên mệnh đề sau chỉ là gợi ý chứ không phải là một chứng minh.)

▷ Moment động lượng riêng đo được của các vật luôn luôn là bội của $\hbar$.

Thuyết lượng tử phát biểu rằng moment động lượng của mọi vật tăng lên từng bậc. Moment động lượng bị lượng tử hoá. Kết quả này được khẳng định bằng nhiều thí nghiệm.

Nhưng chuyển động quay còn nhiều điểm thú vị hơn. Nhờ lượng tử tác dụng, giống như động lượng, moment động lượng cũng có tính mờ. Có một hệ thức bất định cho moment động lượng L. Biến bổ túc là phase φ của chuyển động quay. Hệ thức bất định này có thể phát biểu theo nhiều cách. Biểu thức gần đúng đơn giản nhất – và như vậy là *không có* biểu thức chính xác – là

Xem 47
Xem 48
Trang 49

$$\Delta L\, \Delta\varphi \geqslant \frac{\hbar}{2} \,. \tag{29}$$

Đây rõ ràng là một biểu thức gần đúng: hệ thức này chỉ đúng đối với moment động lượng lớn. Trong bất cứ trường hợp nào, biểu thức đều cho ta biết rằng chuyển động quay hành xử tương tự như chuyển động tĩnh tiến. Biểu thức này không thể đúng khi moment động lượng nhỏ, vì $\Delta\varphi$ theo định nghĩa không thể lớn hơn 2π. Đặc biệt, các trạng thái riêng của moment động lượng có $\Delta L = 0$.*

Độ bất định của moment động lượng xuất hiện trong mọi vật vĩ mô. Ta có thể nói rằng độ bất định xuất hiện với mọi trường hợp khi ta có thể đo được phase của hệ.

Sự lượng tử hoá và độ bất định của moment động lượng có các hệ quả quan trọng. Nói theo cách cổ điển, cực của Trái đất là nơi không chuyển động khi một quan sát viên không quay quan sát nó. Cho nên, tại nơi đó vật chất có vị trí và động lượng xác định. Tuy vậy, lượng tử tác dụng lại cấm điều này. Không thể có một cực Bắc trên Trái đất.

* Một công thức *chính xác* của hệ thức bất định đối với moment động lượng là

$$\Delta L\, \Delta\varphi \geqslant \frac{\hbar}{2} |1 - 2\pi P(\pi)| \,, \tag{30}$$

trong đó $P(\pi)$ là xác suất chuẩn hoá khi vị trí góc có giá trị π. Đối với một trạng thái riêng của moment động lượng, ta có $\Delta\varphi = \pi/\sqrt{3}$ và $P(\pi) = 1/2\pi$. Biểu thức chính xác này đã được kiểm tra và khẳng định bằng thí nghiệm.

Xem 49

Nói chính xác hơn, ý tưởng về một trục quay *cố định* chỉ là gần đúng và tổng quát thì nó không đúng. Điều này đặc biệt áp dụng cho các hạt lượng tử quay.

Chuyển động quay của quanton

Ảnh hưởng của lượng tử tác dụng lên chuyển động quay của các hạt vi mô, như nguyên tử, phân tử hay hạt nhân, đặc biệt thú vị. Ta nên nhớ rằng tác dụng và moment động lượng có cùng đơn vị. Độ chính xác khi đo moment động lượng phụ thuộc vào độ chính xác của góc quay. Nhưng nếu một hạt *vi mô* quay, ta không thể quan sát chuyển động này: điều tương phản cơ bản với các vật *vĩ mô*. Thật ra các thí nghiệm đều khẳng định rằng nhiều hạt vi mô có góc quay không thể quan sát được. Thí dụ như trong nhiều trường hợp (nhưng không phải là tất cả), một hạt nhân nguyên tử quay nửa vòng thì không khác gì hạt nhân không quay.

Nếu một hạt vi mô có một góc quay không thể quan sát được *nhỏ nhất*, lượng tử tác dụng sẽ đưa tới kết luận rằng moment động lượng của nó *không thể* bằng 0. Nó phải luôn luôn đang quay. Do đó ta cần kiểm tra mỗi hạt xem, góc quay không thể quan sát được của nó, nhỏ nhất là bao nhiêu. Các vật lý gia đã kiểm tra mọi hạt trong thiên nhiên bằng thí nghiệm và tìm ra góc quay không thể quan sát được nhỏ nhất (tuỳ theo loại hạt) là 0, 4π, 2π, $4\pi/3$, π, $4\pi/5$, $2\pi/3$ v.v...

Chúng ta hãy lấy một thí dụ. Một hạt nhân nào đó có góc quay không thể quan sát được nhỏ nhất là *nửa* vòng. Đây là trường hợp một hạt nhân hình phỏng cầu (trông như một trái banh rugby) quay quanh trục ngắn, như hạt nhân ^{23}Na. Trong trường hợp này thì góc quay có thể quan sát được lớn nhất và độ bất định đều là *1/4* vòng. Vì độ biến đổi hay tác dụng do chuyển động quay tạo ra là số vòng quay nhân cho moment động lượng, ta tìm được moment động lượng của hạt nhân này là $2 \cdot \hbar$.

Sau cùng từ góc quay cực tiểu ta suy ra được moment động lượng của một hạt vi mô có thể là 0, $\hbar/2$, $\hbar$, $3\hbar/2$, $2\hbar$, $5\hbar/2$, $3\hbar$ v.v... Nói cách khác, moment động lượng riêng của một hạt, thường được gọi là *spin*, là một bội số nguyên của $\hbar/2$. Spin mô tả hành trạng của một hạt khi quay.

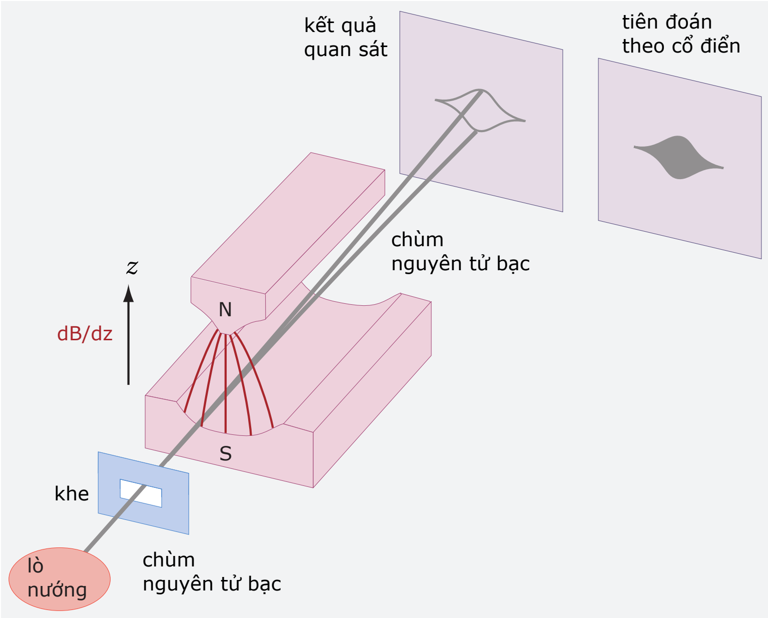
Một hạt quay như thế nào? Lúc này, ta chưa biết cách *minh hoạ* chuyển động quay. Nhưng ta có thể *cảm nhận* nó – giống như khi ta chứng minh rằng ánh sáng được tạo bằng các thực thể đang quay: mọi vật chất, kể cả electron, đều có thể *bị phân cực*. Điều này được chứng minh rõ ràng bằng thí nghiệm nổi tiếng Stern–Gerlach.

Bạc, Stern và Gerlach – sự phân cực của quanton

Sau một năm làm việc vất vả, vào năm 1922, Otto Stern và Walther Gerlach* đã hoàn thành một thí nghiệm đẹp đẽ để nghiên cứu sự phân cực của quanton vật chất. Họ đã biết rằng từ trường không thuần nhất có tác dụng như một bản phân cực đối với điện tích chuyển động tròn. Điện tích chuyển động tròn có mặt trong mọi nguyên tử. Do đó họ đã cho một chùm nguyên tử bạc, bay hơi từ một lò nướng, đi ngang qua một từ trường không đều. Họ thấy rằng chùm hạt bị tách thành *hai chùm riêng biệt*, như đã thấy trong Hình 42. Không có nguyên tử nào ra khỏi từ trường theo một hướng trung gian.

Xem 50

* Otto Stern (1888–1969) và Walther Gerlach (1889–1979) làm việc với nhau tại Đại học Frankfurt. Nhờ đo được moment từ dị thường của proton, Stern nhận được giải Nobel vật lý năm 1943, sau khi ông thoát khỏi Chủ nghĩa quốc xã.



HÌNH 42 Thí nghiệm Stern–Gerlach.

Điều này hoàn toàn tương phản với những gì mà vật lý cổ điển mong đợi.

Việc tách thành *2* chùm hạt là một tính chất riêng của các nguyên tử bạc; ngày nay ta biết rằng đó là do spin của chúng. Các nguyên tử bạc có spin $\hbar/2$, và tuỳ thuộc vào hướng của chúng trong không gian, chúng sẽ bị lệch theo hướng của từ trường hay ngược lại. Sự tách chùm là một hiệu ứng thuần tuý lượng tử: không có chọn lựa trung gian. Thật vậy, thí nghiệm Stern–Gerlach cung cấp một bằng chứng rõ ràng nhất rằng vật lý cổ điển không còn đúng trong lĩnh vực vi mô. Năm 1922, kết quả này hình như kỳ lạ đến nỗi nó được nghiên cứu rất kỹ trên khắp thế giới.

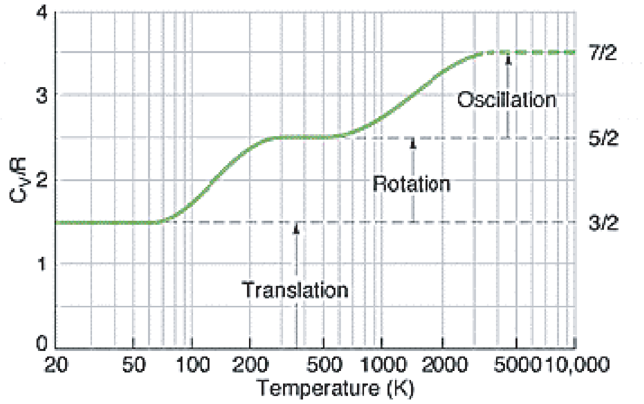
Khi một trong 2 chùm – cụ thể là chùm 'lên' – đi ngang qua dụng cụ thí nghiệm thứ hai thì mọi nguyên tử đều kết thúc trong chùm 'lên'. Lối ra thứ 2, chùm 'xuống', không được dùng tới. Nói cách khác, các chùm lên và xuống, khác với chùm ban đầu, không tách ra thêm. Điều này không làm ta ngạc nhiên.

Nhưng nếu quay dụng cụ thí nghiệm đi 1 góc $\pi/2$ so với lúc đầu thì có hai chùm – 'phải' và 'trái' – được tạo ra bất kể chùm tới đi từ lò nướng hay là từ phần 'lên' của chùm đó. Bộ dụng cụ quay một phần tạo ra hiện tượng tách một phần, không đều. Tỷ lệ hai chùm sau cùng phụ thuộc vào góc quay của bộ dụng cụ thứ hai.

Cũng nên ghi nhận là nếu ta tách chùm từ lò nướng theo phương thẳng đứng rồi theo phương nằm ngang thì ta sẽ thu được kết quả khác với khi ta tách chùm theo thứ tự ngược lại. (Bạn có thể tự kiểm tra điều này.) Quá trình tách không có tính giao hoán. Khi thứ tự của hai phép toán tạo ra các kết quả khác nhau, các vật lý gia gọi chúng là *không giao hoán*. Vì mọi phép đo cũng là các quá trình vật lý ta suy ra rằng, một cách tổng quát, các phép đo và quá trình trong hệ lượng tử thì không giao hoán.

Câu đố 61 e

Sự tách chùm phụ thuộc vào hướng. Chùm vật chất hành xử hầu như giống với các chùm ánh sáng phân cực. Thật vậy, từ trường không thuần nhất tác dụng lên vật chất về mặt nào đó giống như các bản phân cực tác dụng lên ánh sáng. Các chùm lên và xuống,



HÌNH 43 Một đồ thị lý tưởng hoá của nhiệt dung của hydrogen theo nhiệt độ (© Peter Eyland).

cùng nhau xác định hướng phân cực. Thật vậy, hướng phân cực có thể bị quay đi do tác động của một từ trường *thuần nhất*. Và một chùm bị quay trong một nam châm không quay hành xử giống như một chùm không quay trong một từ trường quay.

Tóm lại, quanton vật chất có thể bị phân cực. Ta có thể hình dung sự phân cực là sự định hướng của một trục quay bên trong của quanton có khối lượng. Để cho nhất quán, ta phải tưởng tượng trục quay tiến động chung quanh hướng phân cực. Như vậy, các hạt lượng tử có khối lượng giống các photon về khả năng phân cực của chúng.

Các câu đố vui và lạ về vật chất lượng tử

> “Có thể đi bộ trong khi đọc nhưng không thể đọc trong khi đi bộ.”
>
> Serge Pahaut

Lượng tử tác dụng hàm ý rằng không có *hình fractal* trong thiên nhiên. Mọi vật có cấu tạo hạt. Và hạt là những đám mây. Thuyết lượng tử đòi hỏi mọi hình dạng trong thiên nhiên đều là các *đám mây* ‘mờ’.

* *

Nguyên tử có thể quay hay không? Nguyên tử có thể rơi trên sàn nhà rồi lăn tròn dưới bàn hay không? Nguyên tử có thể quay với tốc độ cao hay không? Câu trả lời là ‘không’ với tất cả các câu hỏi này vì moment động lượng bị lượng tử hoá; hơn nữa, nguyên tử không phải là vật rắn mà là các đám mây. Trường hợp một vật vĩ mô quay càng ngày càng chậm rồi ngừng lại không hiện hữu trong thế giới vi mô. Lượng tử tác dụng không cho phép điều này.

Xem 51

* *

Ánh sáng bị khúc xạ khi đi vào môi trường đậm đặc hơn. Sóng vật chất có hành xử giống như vậy không? Vâng, có. Năm 1995, David Pritchard chứng minh điều này đối với sóng sodium khi đi vào hỗn hợp khí helium và xenon.

Xem 52

* *

Nhiều hiệu ứng lượng tử có đường biểu diễn là hình bậc thang. Một thí dụ quan trọng

là nhiệt dung mol của hydrogen H_2 , biểu diễn trong Hình 43. Khi tăng nhiệt độ từ 20 tới 8 000 K, nhiệt dung mol có hai bậc, bậc 1 từ $3R/2$ tới $5R/2$, và rồi đến $7R/2$. Bạn có thể giải thích điều này không?

* *

Phần lớn các thí dụ về chuyển động lượng tử đã cho đến nay bắt nguồn từ các hiệu ứng điện từ. Bạn có thể lý luận là lượng tử tác dụng cũng phải áp dụng cho chuyển động hạt nhân, và đặc biệt, cho tương tác hạt nhân không?

Câu đố 62 s

* *

Nguyên lý bất định có nhiều dạng công thức khác. Một công thức thú vị là của Sabbata và Sivaram, người đã giải thích vào năm 1992 rằng hệ thức sau đây giữa nhiệt độ và thời gian cũng đúng:

$$\Delta T \Delta t \geqslant \hbar / k . \qquad (31)$$

Xem 53

Ở đây, k là hằng số Boltzmann. Mọi thí nghiệm kiểm chứng cho đến nay đều xác nhận kết quả này.

Tóm tắt đầu tiên về chuyển động của các hạt lượng tử

Tóm lại, sự tách chùm 'số' mà ta đã thấy trong thí nghiệm Stern–Gerlach và tính chất sóng của vật chất buộc chúng ta phải nghĩ lại về cách mô tả chuyển động. Chúng chứng tỏ rằng chuyển động của vật chất vi mô suy ra từ lượng tử tác dụng, giá trị tác dụng có thể quan sát được nhỏ nhất. Trong Thuyết tương đối đặc biệt, việc có mặt của tốc độ cực đại buộc chúng ta đưa ra khái niệm không-thời gian rồi cải tiến lại việc mô tả chuyển động. Trong Thuyết tương đối tổng quát, lực cực đại khiến chúng ta phải đưa ra khái niệm chân trời và độ cong, rồi lại phải cải tiến việc mô tả chuyển động. Đến lúc này, sự hiện hữu của lượng tử tác dụng và tính chất sóng của vật chất buộc chúng ta làm 2 bước tương tự: đầu tiên đưa ra khái niệm hàm sóng rồi cải tiến việc mô tả chuyển động của vật chất.

CHƯƠNG 4

MÔ TẢ VẬT CHẤT VÀ CHUYỂN ĐỘNG CỦA NÓ THEO QUAN NIỆM LƯỢNG TỬ

Xem 54

> "Die Quanten sind doch eine hoffnungslose Schweinerei!** Max Born

Trong đời sống hằng ngày và trong vật lý cổ điển, ta nói rằng một hệ *có* một vị trí, *có* một hướng, *có* một trục quay và *ở trong* một trạng thái có động lượng riêng. Trong vật lý cổ điển, ta có thể nói theo cách này vì *trạng thái* – tình trạng mà một hệ 'đang' tham gia và các tính chất mà hệ 'có' – trùng với *các kết quả đo được*. Chúng trùng nhau vì các phép đo luôn luôn được xem là một tác động lên hệ thống mà ta có thể bỏ qua.

Tuy vậy, vì có lượng tử tác dụng, tương tác mà ta cần để thực hiện một phép đo trên hệ thống *không thể* nhỏ tuỳ ý. Do đó, lượng tử tác dụng đã khiến cho ta *không thể* tiếp tục nói rằng một hệ *có* động lượng, *có* vị trí hay *có* một trục quay. Lượng tử tác dụng buộc ta sử dụng ý tưởng về mũi tên quay và đưa ra khái niệm *hàm sóng* hay *hàm trạng thái*. Ta hãy xem lý do và cách thực hiện.

CÁC TRẠNG THÁI VÀ CÁC PHÉP ĐO – HÀM SÓNG

Trang 84

Thí nghiệm Stern–Gerlach chứng tỏ rằng các giá trị đo được về *hướng* của spin *không phải là* trị thực mà là kết quả của các quá trình đo (trong trường hợp này là do sự tương tác với trường không thuần nhất). Điều này trái với *độ lớn* của spin là trị thực và độc lập với trạng thái và phép đo. Tóm lại, lượng tử tác dụng buộc ta phân biệt cẩn thận 3 khái niệm:

— trạng thái của hệ;
— thao tác đo;
— kết quả của phép đo.

Trái với trường hợp thông thường, cổ điển, *trạng thái* của một hệ lượng tử – các tính chất mà một hệ 'có' – thì *không* mô tả được bằng kết quả của phép đo. Minh hoạ đơn giản nhất cho sự khác biệt này là hệ gồm một hạt đơn lẻ trong thí nghiệm Stern–Gerlach. Thí nghiệm cho ta thấy số đo spin trên một cái (lò) thông thường thì có lúc là 'lên' (tức là $+1$), và có lúc lại là 'xuống' (tức là -1). Như vậy một nguyên tử trong một cái lò thông thường, không có hướng riêng. Chỉ *sau khi* đo, một nguyên tử mới ở trong trạng thái 'lên' hay 'xuống'.

** 'Lượng tử là một mớ hổ lốn không giá trị!'

Người ta cũng nhận thấy rằng khi đưa trạng thái 'lên' vào một dụng cụ đo thứ hai thì chỉ nhận được trạng thái 'lên': như vậy các trạng thái đặc biệt, được gọi là *trạng thái riêng*, không chịu ảnh hưởng của phép đo.

Sau cùng, thí nghiệm Stern–Gerlach và các biến cách của nó cho thấy rằng các trạng thái có thể bị quay đi do trường bên ngoài tác dụng: trạng thái của nguyên tử có một hướng trong không gian. Các thí nghiệm cũng chứng tỏ rằng các trạng thái sẽ quay khi nguyên tử chuyển động trong không gian.

Các quan sát thực nghiệm có thể được mô tả trực tiếp. Vì đo là thao tác đưa vào một trạng thái nhập và nhận một trạng thái xuất cùng với một kết quả đo, nên ta có thể nói:

▷ *Trạng thái* được mô tả bằng các mũi tên quay hay vector quay.
▷ *Phép đo* các biến động lực là các thao tác trên các vector trạng thái.
▷ *Các kết quả đo* là *số thực*; và giống như trong vật lý cổ điển, chúng thường phụ thuộc vào quan sát viên.

Đặc biệt, ta đã phân biệt hai đại lượng không thể phân biệt được trong vật lý cổ điển: các trạng thái và các kết quả đo. Nếu có sự phân biệt này, Thuyết lượng tử khá đơn giản, như ta sẽ thấy.

Nếu lượng tử tác dụng không thể nhỏ bằng 0 thì phép đo một biến động lực là một tương tác với một hệ thống và là một sự biến đổi trạng thái. Do đó, vật lý lượng tử mô tả các biến động lực vật lý giống như các *toán tử*, hay một cách tương đương, như các phép biến đổi. Thí nghiệm Stern–Gerlach cho thấy rất rõ điều này: sự tương tác với trường ảnh hưởng đến các nguyên tử: một số theo cách này và một số theo cách khác. Đúng ra mọi thí nghiệm đều cho thấy:

▷ Về mặt toán học, các trạng thái là *các vector phức*, hay các mũi tên quay trong một không gian trừu tượng. Không gian của mọi trạng thái/mũi tên khả hữu này là một *không gian Hilbert*.

Trang 237

▷ Về mặt toán học, các phép đo là các phép biến đổi tuyến tính, hay chính xác hơn, chúng được mô tả bằng các *toán tử* (hay matrix) tự phó hay *Hermite*,
▷ Về mặt toán học, *sự thay đổi quan điểm* được mô tả bằng các *toán tử* (hay matrix) *đơn nguyên* tác dụng lên các trạng thái, các mũi tên và trên các toán tử của phép đo.

Các thí nghiệm cơ-lượng tử cũng cho ta thấy rằng phép đo một biến động lực có thể chỉ cho một kết quả là một *trị riêng* của phép biến đổi tương ứng. Những trạng thái kết quả sau khi đo, những trạng thái đặc biệt *không* bị ảnh hưởng khi các biến tương ứng được đo, là các *vector riêng*. Tóm lại, mọi chuyên gia về chuyển động phải biết đâu là trị riêng và đâu là vector riêng.

Đối với một phép biến đổi tuyến tính bất kỳ T, vector đặc biệt ψ được biến đổi thành nhiều vector,

$$T\psi = \lambda\psi \tag{32}$$

được gọi là *vector riêng* (hay *trạng thái riêng*) và hệ số λ được gọi là *trị riêng* liên kết. Các thí nghiệm cho thấy:

▷ Trạng thái của hệ *sau khi* đo được cho bởi vector riêng tương ứng với trị riêng đã đo.

Trong thí nghiệm Stern–Gerlach, các trạng thái riêng là các trạng thái 'lên' và 'xuống'. Nói chung, các trạng thái riêng là các trạng thái không thay đổi khi ta đo các biến tương ứng. Các trị riêng của các toán tử Hermite luôn luôn là số thực để bảo đảm sự nhất quán: mọi kết quả đo đều là số thực.

Tóm lại, lượng tử tác dụng buộc ta phải phân biệt 3 khái niệm hoà trộn với nhau trong vật lý cổ điển: *trạng thái* của hệ, *phép đo* trên hệ đó và *kết quả đo*. Lượng tử tác dụng buộc ta thay đổi từ ngữ mà ta dùng để mô tả thiên nhiên và ta phải sử dụng các khái niệm biệt hoá hơn. Bây giờ đến giai đoạn chính: mô tả *chuyển động* bằng các khái niệm này. Đây là điều mà ta gọi là 'Thuyết lượng tử'.

Việc hình dung một hàm sóng: các mũi tên quay và các đám mây xác suất

Ta đã mô tả trạng thái của một quanton bằng một mũi tên. Đúng ra đây là cách biểu diễn gần đúng đối với quanton định xứ. Nếu chính xác hơn,

▷ Trạng thái của một hạt lượng tử được mô tả bằng một phân bố không gian của các mũi tên mà ta gọi là *hàm sóng*.

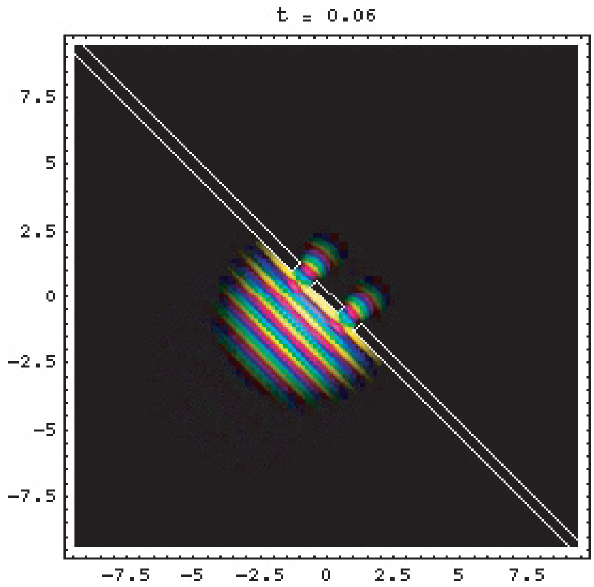
Để dựng lên hình ảnh của một hàm sóng, đầu tiên ta tưởng tượng một hạt lượng tử được định vị thật sát sao. Trong trường hợp này, hàm sóng của một quanton tự do có thể được mô tả bằng một mũi tên quay đơn lẻ.

Thí nghiệm chứng tỏ rằng khi một quanton *định xứ* du hành qua không gian, mũi tên gắn với nó sẽ quay. Nếu hạt phi tương đối tính và spin có thể bỏ qua, chuyển động quay xảy ra trong mặt phẳng vuông góc với hướng chuyển động. Đầu mũi tên sẽ vẽ ra một *helix* quanh hướng chuyển động. Trong trường hợp này, trạng thái tại thời điểm đã cho được mô tả bằng góc của mũi tên. Góc này là *phase lượng tử*. Phase lượng tử chịu trách nhiệm cho các tính chất sóng của vật chất như ta sẽ thấy. Bước sóng và tần số của helix được xác định bởi động lượng và động năng của hạt.

Nếu hạt *không định xứ* – nhưng vẫn còn phi tương đối tính và vẫn có thể bỏ qua spin – trạng thái hay hàm sóng xác định một mũi tên quay *tại mỗi điểm trong không gian*. Chuyển động quay này vẫn còn xảy ra trong một mặt phẳng vuông góc với hướng chuyển động. Nhưng bây giờ ta có một phân bố các mũi tên mà tất cả đều vẽ ra các helix song song với hướng chuyển động. Tại mỗi điểm trong không gian và thời gian, trạng thái có một phase lượng tử và một chiều dài của mũi tên. Chiều dài các mũi tên giảm theo hướng ra xa vô hạn trong không gian.

Hình 44 cho ta thấy một thí dụ về sự tiến hoá của hàm sóng đối với các hạt phi tương đối tính, không có spin. Hướng của mũi tên tại mỗi điểm được biểu diễn bằng màu sắc tại một điểm cụ thể. Chiều dài mũi tên được biểu diễn bằng cường độ sáng của màu sắc. Đối với các hạt phi tương đối tính không có spin, hàm sóng $\psi(t,x)$ được mô tả bằng một chiều dài và một phase: nó là một *số phức* tại mỗi điểm trong không gian. Phase là điểm cốt yếu đối với hiện tượng giao thoa và các hiện tượng sóng khác. Biên độ, chiều dài của mũi tên địa phương, mô tả đại lượng đo được nào? Vật lý gia nổi tiếng Max Born đã cho

Trang 226



HÌNH 44 Chuyển động của một hàm sóng, trạng thái lượng tử, xuyên qua một khe kép, cho thấy cả hai tính chất hạt và sóng của vật chất. Mật độ trạng thái, liên hệ với chiều dài các mũi tên, được hiển thị bằng cường độ sáng và phase địa phương được mã hoá bằng màu sắc. (QuickTime film © Bernd Thaller)

câu trả lời:

▷ Biên độ của hàm sóng là một *biên độ xác suất*. Bình phương của nó, tức là đại lượng $|\psi(t,x)|^2$, cho ta xác suất để tìm thấy hạt tại điểm x lúc t.

Nói cách khác, hàm sóng là một kết hợp của hai ý: một mặt, hàm sóng là một *đám mây*; mặt khác, tại mỗi điểm của đám mây ta phải tưởng tượng ra một mũi tên. Theo thời gian, mũi tên quay và đám mây thay đổi hình dạng.

▷ Hàm sóng là một đám mây của các mũi tên quay.

Việc mô tả trạng thái của một hạt vật chất bằng một đám mây của các mũi tên quay là một bước quan trọng để hình dung ra các tính chất sóng của vật chất.

Ta có thể làm rõ điều này thêm một chút.

▷ Trong mỗi quá trình mà phase của hàm sóng không quan trọng, hình ảnh đám mây của hàm sóng là đầy đủ và đúng.

Thí dụ như chuyển động của nguyên tử, phân tử trong chất khí hay chất lỏng có thể được tưởng tượng như chuyển động của các đám mây. Ta cần nhấn mạnh rằng các đám mây ở đây khá cứng: ta cần nhiều năng lượng để làm biến dạng các đám mây nguyên tử. Độ cứng của một tinh thể điển hình thì liên hệ trực tiếp với độ cứng của các đám mây nguyên tử bên trong tinh thể. Nguyên tử là các đám mây cực kỳ cứng rắn.

Nói cách khác,

▷ Trong mỗi quá trình mà phase của hàm sóng đóng vai trò quan trọng, hình ảnh đám mây của hàm sóng cần mở rộng bằng các mũi tên quay tại mỗi điểm.

Đây là trường hợp của các quá trình giao thoa của các quanton nhưng cũng là của việc mô tả chính xác các liên kết hoá học.

Thầy cô thường bàn luận về cách tốt nhất để giải thích các hàm sóng. Một số Thầy chỉ thích sử dụng mô hình đám mây, người khác lại không thích sử dụng một tí hình ảnh nào. Cả hai cách tiếp cận đều dùng được nhưng cách tiếp cận hữu ích nhất là tưởng tượng trạng thái hay hàm sóng của một hạt lượng tử *phi tương đối tính* là một mũi tên tại mỗi điểm trong không gian. Tần số quay của bộ các mũi tên là *động năng* của hạt; bước sóng của chuyển động của mũi tên – chu kỳ của helix mà đầu của các mũi tên – hay của mũi tên trung bình – vẽ ra trong khi chuyển động – là *động lượng* của hạt lượng tử.

Một mũi tên tại mỗi điểm trong không gian là một *trường* (toán học). Trường được tập trung trong một vùng nơi hạt định xứ và biên độ của trường liên hệ với xác suất để tìm thấy hạt. Do đó trường trạng thái, hàm sóng hay hàm trạng thái, là một *đám mây mũi tên*.

Nên nhớ rằng mặc dù hàm sóng có thể được dùng để xác định một mũi tên tại mỗi điểm trong không gian, toàn bộ hàm sóng cũng có thể được mô tả như là một vector, lần này trong một không gian Hilbert. Đối với các hạt tự do, tức là, các hạt không chịu tác dụng của ngoại lực, không gian Hilbert có vô hạn chiều! Tuy vậy, việc tính toán trong một không gian như vậy không khó. Tích vô hướng của hai hàm sóng là tích phân không gian của tích giữa liên hiệp phức của hàm thứ nhất và hàm thứ hai (không liên hiệp). Với định nghĩa này, mọi khái niệm vector (vector đơn vị, vector null, vector cơ bản, v.v...) đều có thể áp dụng cho các hàm sóng.

Trang 237

Câu đố 63 e

Tóm lại, đối với các hạt phi tương đối tính, không có spin, *trạng thái hay hàm sóng của một hạt lượng tử là một đám mây hay một sóng phân bố, của những mũi tên quay.* Về mặt này thì đám mây lượng tử hơi khác thường. Vì một đám mây lượng tử được các mũi tên nhỏ tạo thành, mỗi điểm của đám mây được mô tả bằng một mật độ địa phương và một hướng địa phương. Tính chất sau không có trong các đám mây thông thường.

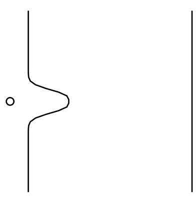
Trong nhiều thập kỷ người ta đã ngầm giả định rằng một hàm sóng không thể được hình dung đơn giản hơn một đám mây hay các mũi tên quay. Chỉ trong các năm sau cùng người ta mới thấy rằng còn có cách hình dung khác cho các đám mây lượng tử như vậy; một cách sẽ được trình bày trong quyển cuối của bộ sách này.

Quyển VI, trang 174

Sự tiến hoá của trạng thái – phương trình Schrödinger

Sự mô tả trạng thái của một quanton phi tương đối tính không có spin bằng một đám mây quay xác định *hoàn toàn* cách mà hàm sóng tiến hoá theo thời gian. Thật vậy, đối với các hạt lượng tử như thế, sự tiến hoá suy ra từ năng lượng toàn phần, tổng của động năng và thế năng $T + V$ và các tính chất sóng của vật chất:

▷ Tốc độ biến đổi địa phương của mũi tên trạng thái ψ được tạo ra bởi năng



lượng toàn phần địa phương, hay Hamiltonian, $H = T + V$:

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi = H\psi \,. \qquad (33)$$

Phương trình nổi tiếng này là *phương trình chuyển động Schrödinger.** *Phương trình tiến hoá này* áp dụng cho mọi hệ lượng tử và là một trong những đỉnh cao của vật lý hiện đại.

Xem 55
Xem 56

Đúng ra, Erwin Schrödinger đã tìm thấy phương trình này bằng hai cách khác nhau. Trong bài báo đầu tiên, ông tìm ra từ nguyên lý biến phân. Trong bài báo thứ hai, ông trực tiếp suy ra phương trình bằng một câu hỏi đơn giản: trạng thái tiến hoá như thế nào? Ông đã biết rằng trạng thái của một quanton biến đổi vừa giống một sóng vừa giống một hạt. Một sóng được mô tả bằng một trường mà ông đã ký hiệu là $\psi(t, x)$. Nếu trạng thái ψ biến đổi như một sóng thì hàm sóng tương ứng phải là một biên độ W nhân cho hệ số phase $\mathrm{e}^{i\boldsymbol{kx}-\omega t}$. Trạng thái có thể được viết như sau

$$\psi(t, x) = W(t, x)\,\mathrm{e}^{i\boldsymbol{kx}-\omega t} \,. \qquad (34)$$

Biên độ W là *chiều dài* của mũi tên địa phương; phase là *hướng* của mũi tên địa phương. Một cách tương đương, biên độ là mật độ địa phương của đám mây và phase là hướng địa phương của đám mây.

Ta đã biết rằng sóng lượng tử cũng phải hành xử như một hạt có khối lượng m. Đặc biệt, hệ thức phi tương đối tính giữa năng lượng và động lượng $E = \boldsymbol{p}^2/2m + V(\boldsymbol{x})$ – ở đây $V(\boldsymbol{x})$ là hàm thế ở vị trí $\boldsymbol{x}$ – phải nghiệm đúng cho các sóng này. Hai hệ thức de Broglie (22) đối với bước sóng vật chất và tần số vật chất lúc đó cho ta

Trang 77

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = H\psi = \frac{-\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi + V(\boldsymbol{x})\psi \,. \qquad (35)$$

Đây là dạng đầy đủ của phương trình sóng Schrödinger. ∇^2 là toán tử Laplace, về bản chất là đạo hàm bậc hai của toạ độ không gian. Nó mô tả phương thức mà sóng mũi tên, hàm sóng ψ liên kết với một hạt, tiến hoá theo thời gian. Năm 1926, *phương trình sóng* này đối với trường phức ψ lập tức nổi tiếng khi Schrödinger sử dụng nó, bằng cách đưa vào hàm thế tác dụng lên một electron gần proton, để tính toán các mức năng lượng của nguyên tử hydrogen. Trong một nguyên tử hydrogen, ánh sáng được một electron đơn lẻ bên trong nguyên tử phát ra; do đó sự mô tả chính xác chuyển động của electron trong nguyên tử hydrogen cho phép ta mô tả những tần số ánh sáng mà nó có thể phát ra. (Ta sẽ thực hiện các tính toán và so sánh với thí nghiệm dưới đây.) Trước tiên, phương trình Schrödinger đã giải thích rằng hydrogen chỉ phát ra các màu *rời rạc*. Thêm nữa, tần số

Trang 182

* Erwin Schrödinger (b. 1887 Vienna, d. 1961 Vienna) là một *vật lý gia bohémien* nổi tiếng, luôn luôn sống trong nhà với hai phụ nữ. Năm 1925 ông khám phá ra phương trình khiến cho ông nổi tiếng trên thế giới và mang lại giải Nobel vật lý năm 1933. Ông cũng là người đầu tiên chứng tỏ rằng bức xạ do Victor Hess khám phá ở Vienna thực ra đến từ vũ trụ. Ông rời Đức và Áo để tránh sự thù ghét của Chủ nghĩa quốc xã và trở thành một giáo sư ở Dublin trong nhiều năm. Ở đó ông đã xuất bản một cuốn sách nổi tiếng và quan trọng *Đời sống là gì?*. Trong quyển sách đó, ông đã tiếp cận với sự tiên đoán về acid nucleic DNA, lúc đó chưa ai biết, chỉ từ những nhận thức lý thuyết.



HÌNH 45 Erwin Schrödinger (1887–1961)

của ánh sáng phát xạ phù hợp với sự tiên đoán của phương trình đến 5 chữ số thập phân. Sau cùng, kích thước của các nguyên tử đã được tiên đoán đúng. Đây là các kết quả quan trọng, đặc biệt nếu ta nhớ rằng vật lý cổ điển không thể giải thích ngay cả sự hiện hữu của nguyên tử và sự phát xạ ánh sáng của chúng! Trái lại, vật lý lượng tử giải thích mọi tính chất và màu sắc của nguyên tử với độ chính xác cao. Nói cách khác, sự khám phá ra lượng tử tác dụng đưa việc mô tả chuyển động của vật chất tới một đỉnh cao mới.

Đúng ra sự mô tả quanton vật chất một cách chính xác chỉ được tìm ra khi cả hai *hiệu ứng spin* và hệ thức năng–động lượng *tương đối tính* đều được tính đến. Người ta đã tìm thấy không có sai lệch giữa các tính toán tương đối tính và các thí nghiệm. Ngay cả ngày nay, sự tiên đoán và đo lường phổ nguyên tử vẫn còn chính xác và đúng đắn trong việc nghiên cứu toàn bộ thiên nhiên: trường hợp mà độ chính xác của thí nghiệm cho phép, các giá trị đã tính toán đều phù hợp với các kết quả thí nghiệm tới 13 chữ số thập phân.

Trang 189

Hiện tượng tự giao thoa của quanton

Trang 77

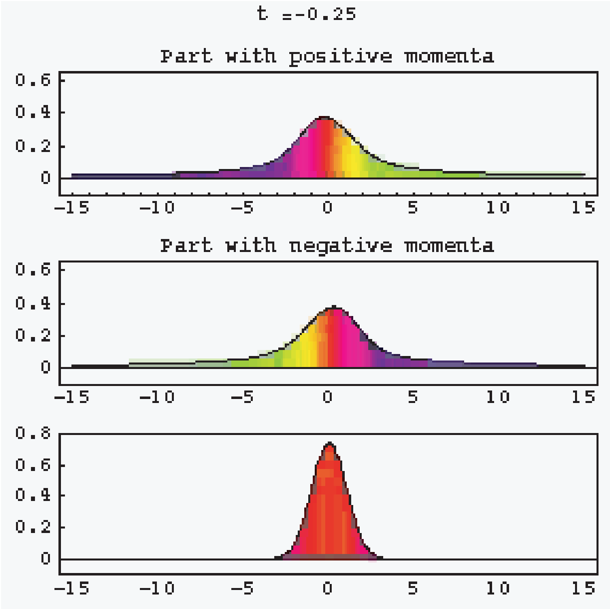
Sóng giao thoa với nhau. Mọi thí nghiệm bao gồm các thí dụ trong Hình 38 và Hình 39, đều khẳng định rằng mọi hạt lượng tử và đặc biệt mọi quanton vật chất đều có thể giao thoa với nhau. Giao thoa là một hệ quả trực tiếp của phương trình Schrödinger, như film của Hình 44 cho thấy. Film minh hoạ lời giải của phương trình Schrödinger cho một hạt lượng tử chuyển động qua một khe kép. Film hình dung cách mà khe kép gây ra sự nhiễu xạ và giao thoa cho một hạt vật chất.

Trang 91

Hoá ra phương trình Schrödinger mô phỏng và giải thích đầy đủ các quan sát về sự giao thoa của vật chất: đó cũng là sự giao thoa của các quanton vật chất do sự tiến hoá của các đám mây mũi tên quay. Và giống như mọi hiện tượng giao thoa, cường độ địa phương của hình giao thoa tỷ lệ với bình phương của biên độ sóng địa phương $|W|^2$. Và biên độ sóng địa phương phụ thuộc vào phase của các đoàn sóng giao thoa với nhau. Có một sự tương tự hoàn toàn với sự giao thoa ánh sáng; cả đến công thức cũng giống.

Ta nên nhớ mặc dù hàm sóng trải rộng trên toàn màn hình của máy dò ngay trước khi nó chạm vào đó nhưng nó chỉ tạo thành một điểm định xứ trên màn hình. Hiệu ứng này, được gọi là *sự suy sụp của hàm sóng*.

Trang 154



HÌNH 46 Sự tiến hoá của một hàm sóng (đường cong dưới cùng) không có động lượng và chuyển động của các phần có động lượng dương và âm. Phase địa phương được mã hoá thành các màu. (QuickTime film © Bernd Thaller)

Tốc độ của các quanton

Chúng ta hãy đi sâu một chút vào các chi tiết của sự mô tả cho bởi phương trình Schrödinger (35). Phương trình này biểu diễn một mối liên kết đơn giản: tốc độ cổ điển của một hạt vật chất là *vận tốc nhóm* của hàm sóng ψ. Nhìn từ xa, hàm sóng chuyển động như một hạt *cổ điển*.

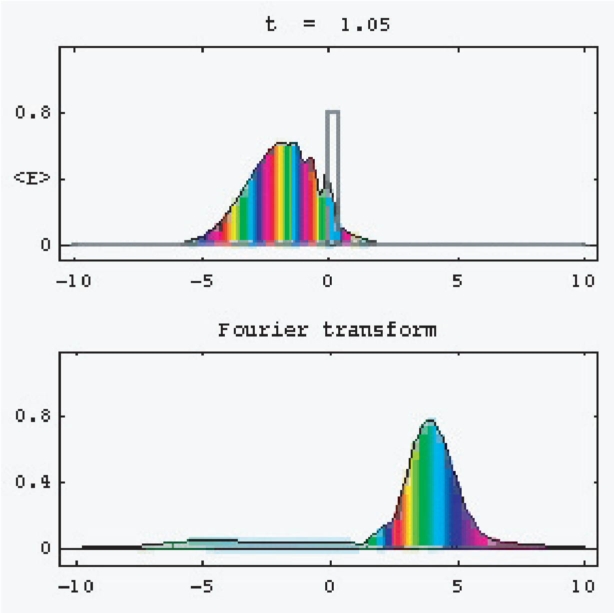
Nhưng ta đã biết từ vật lý cổ điển là vận tốc nhóm không phải lúc nào cũng được xác định: trong những trường hợp nhóm tan ra thành nhiều đỉnh, khái niệm vận tốc nhóm không dùng được. Đây cũng là trường hợp mà chuyển động lượng tử khác với chuyển động cổ điển, như ta sẽ thấy sau đây. Nhưng trong một số trường hợp như các hạt tự do hay gần như tự do, ta thấy rằng hàm sóng chuyển động giống như một hạt cổ điển.

Trang 154

Phương trình Schrödinger tạo ra một điểm khác biệt: vận tốc và vị trí của vật chất không phải là các biến độc lập và không thể chọn một cách tuỳ ý. Điều kiện ban đầu của một hệ là giá trị ban đầu của hàm sóng. Ta không phải và không thể chỉ ra các giá trị dẫn xuất. Thật vậy, thí nghiệm chứng tỏ rằng các hệ lượng tử được mô tả bởi một phương trình *bậc nhất*, khác hẳn các hệ cổ điển. Lý do của sự khác biệt này bắt nguồn từ lượng tử tác dụng và giới hạn do nó áp đặt trên các biến trạng thái khả hữu của một hạt.

Sự tán sắc của quanton

Đối với các hạt lượng tử tự do, phương trình Schrödinger bao hàm *sự tán sắc*, như được minh hoạ trong Hình 46. Hãy tưởng tượng một hàm sóng định xứ quanh một vị trí khởi đầu đã cho. Một hàm sóng như vậy mô tả một hệ lượng tử đứng yên. Khi thời gian trôi đi, hàm sóng này sẽ *trải rộng ra* trong không gian. Thật vậy, phương trình tiến hoá của Schrödinger tương tự về mặt toán học với phương trình khuếch tán. Giống như một



HÌNH 47 Hiện tượng xuyên hầm của một hàm sóng qua một đồi thế (cột hình chữ nhật): phần lớn hàm sóng bị phản xạ và một phần xuyên qua bên kia. Phase địa phương được mã hoá thành các màu. (QuickTime film © Bernd Thaller)

giọt mực trong nước loang ra, trạng thái của một hạt lượng tử định xứ trong không gian cũng trải rộng ra. Đúng ra vị trí có xác suất lớn nhất vẫn không thay đổi nhưng xác suất để tìm thấy hạt ở các vị trí cách xa vị trí ban đầu tăng lên theo thời gian. Đối với các hạt lượng tử, hiệu ứng trải rộng này đã được thấy trong nhiều thí nghiệm. Sự trải rộng là hệ quả của tính chất sóng của vật chất và của lượng tử tác dụng $\hbar$. Hiện tượng xảy ra cho quanton đứng yên và do đó cũng xảy ra cho quanton chuyển động. Đối với các vật vĩ mô, người ta không thấy hiện tượng trải rộng: xe cộ hiếm khi di chuyển khỏi chỗ đậu. Thật vậy, Thuyết lượng tử tiên đoán rằng đối với các hệ vĩ mô thì hiệu ứng này rất nhỏ. Bạn có thể giải thích tại sao không?

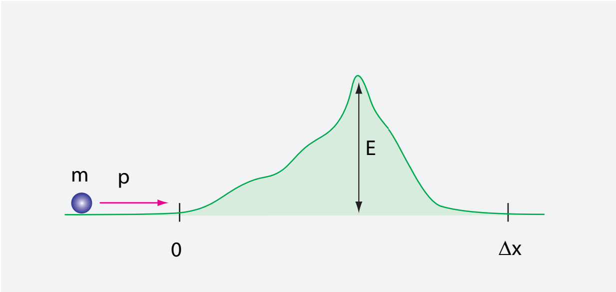
Câu đố 64 ny

Tóm lại, tính chất sóng của vật chất dẫn tới sự trải rộng của sóng. Các hàm sóng có thể tán sắc.

Sự xuyên hầm và các giới hạn của bộ nhớ – sự suy giảm của quanton

'Nhận thức thông thường' cho rằng một trái banh chuyển động chậm không thể lăn qua một đồi cao. Chính xác hơn, vật lý cổ điển cho rằng nếu động năng T nhỏ hơn thế năng V lúc banh ở đỉnh đồi thì banh không thể leo lên đến đỉnh. Trái lại, theo Thuyết lượng tử, có một xác suất dương để vượt qua đồi với trái banh có năng lượng *bất kỳ*.

Trong Thuyết lượng tử, đồi và vật cản được mô tả bằng các rào thế và vật là các hàm sóng. Một hàm sóng bất kỳ đều trải rộng sang *bên kia* của một rào thế bất kỳ có chiều cao và chiều rộng hữu hạn. Hàm sóng cũng sẽ khác 0 *ở* vị trí của rào. Tóm lại, một vật bất kỳ có thể vượt qua một đồi hay rào cản bất kỳ, như ta thấy trong Hình 48. Hiệu ứng này được gọi là *hiệu ứng xuyên hầm*. Nó tương phản hoàn toàn với kinh nghiệm thông thường – và với cơ học cổ điển.



HÌNH 48 Leo đồi.

Hiệu ứng xuyên hầm là kết quả của một tính chất mới hàm chứa trong cách mô tả lượng tử của các ngọn đồi: trong thiên nhiên, một vật cản bất kỳ đều có thể bị vượt qua bằng một nỗ lực *hữu hạn*. Không có vật cản nào không thể vượt qua. Thật vậy, chỉ các thế có chiều cao vô hạn mới làm cho hàm sóng biến mất và không lan qua được bên kia. Nhưng các thế như vậy chỉ có tính gần đúng; các thế trong thiên nhiên đều có chiều cao hữu hạn.

Hiệu ứng xuyên hầm lớn cỡ nào? Việc tính toán cho thấy xác suất truyền qua P được cho gần đúng bởi phương trình

$$P \approx \frac{16T(V-T)}{V^2}\, \mathrm{e}^{-\frac{2w}{\hbar}\sqrt{2m(V-T)}} \qquad (36)$$

trong đó w là chiều rộng của đồi, V là chiều cao, m và T là khối lượng và động năng của hạt. Đối với hệ có nhiều hạt, xác suất (lớn nhất) là tích của các xác suất của các hạt khác nhau.

Chúng ta hãy lấy trường hợp xe trong garage và giả sử rằng xe được làm bằng 10^{28} nguyên tử ở nhiệt độ phòng. Một tường garage điển hình có chiều dày 0.1 m và chiều cao $V = 1\,\mathrm{keV} = 160\,\mathrm{aJ}$ đối với đường đi của một nguyên tử. Ta tính được xác suất để tìm thấy xe bên ngoài garage là

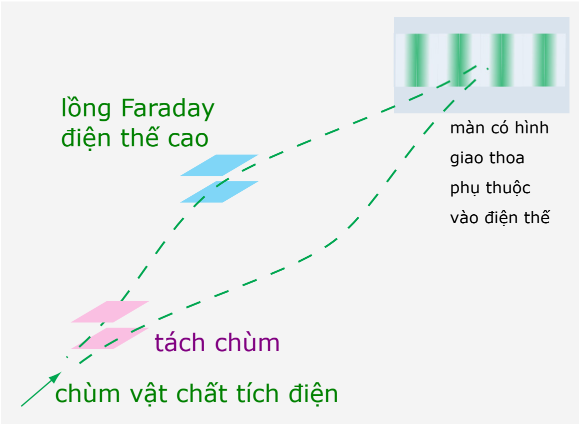
$$P \approx \left(10^{-(10^{12})}\right)^{(10^{28})} \approx 10^{-(10^{40})} \,. \qquad (37)$$

Độ nhỏ của giá trị này (chỉ cần viết xuống là bạn bị thuyết phục ngay) là lý do cảnh sát không bao giờ xét đến, khi xe bị cớ mất. (Thật ra xác suất còn có thể nhỏ hơn nữa. Bạn có thể chỉ ra ít nhất một hiệu ứng đã bị quên trong phép tính đơn giản này không?)

Câu đố 65 s

Điều hiển nhiên là sự xuyên hầm chỉ quan trọng đối với các hệ nhỏ, gồm một số ít hạt và các rào cản mỏng với bề dày cỡ $\hbar/\sqrt{2m(V-T)}$. Hiện tượng xuyên hầm của một nguyên tử được quan sát thấy trong chất rắn ở nhiệt độ cao nhưng không quan trọng trong đời sống hằng ngày. Đối với electron, hiệu ứng dễ nhận ra hơn: bề rộng rào w, đối với hiệu ứng xuyên hầm đáng kể, là

$$w \approx \frac{0.5\,\mathrm{nm}\ \sqrt{\mathrm{aJ}}}{\sqrt{V-T}} \,. \qquad (38)$$



HÌNH 49 Điện thế định xứ trong một giao thoa kế dẫn tới việc dịch chuyển của hình giao thoa.

Ở nhiệt độ phòng, động năng T cỡ 6 zJ; tăng nhiệt độ thì hiệu ứng sẽ tăng. Kết quả là electron dễ dàng xuyên qua rào có bề rộng cỡ vài nguyên tử. Thật vậy, mỗi đèn hình TV sử dụng sự xuyên hầm ở nhiệt độ cao để sinh ra chùm electron tạo nên hình ảnh. Sự nung nóng cần thiết là lý do trong quá khứ, đèn hình TV cần thời gian để hoạt động được.

Sự xuyên hầm của electron cũng giới hạn kích thước vật lý của bộ nhớ máy tính. Chip nhớ không thể nhỏ tuỳ ý. Mạch tích hợp silicon với 1 terabyte bộ nhớ truy xuất ngẫu nhiên (RAM) sẽ không bao giờ có. Bạn có thể hình dung được lý do không? Đúng ra hiệu ứng xuyên hầm giới hạn sự hoạt động của bất kỳ một loại bộ nhớ nào, bao gồm não bộ của chúng ta. Thật vậy, nếu ta có thân nhiệt cao hơn 37°C, ta không thể nhớ được điều gì cả!

Câu đố 66 s

Vì ánh sáng có cấu tạo hạt, nó cũng có thể xuyên qua các rào thế. Rào thế tốt nhất – hay cao nhất – đối với ánh sáng là gương; gương có chiều cao của rào cản cỡ 1 attojoule. Sự xuyên hầm dẫn tới việc ánh sáng *có thể* xuất hiện phía sau gương. Hiện tượng (đã được phát hiện) này được gọi là *sóng phù du*; chúng được sử dụng trong các thí nghiệm và thiết bị có độ chính xác cao.

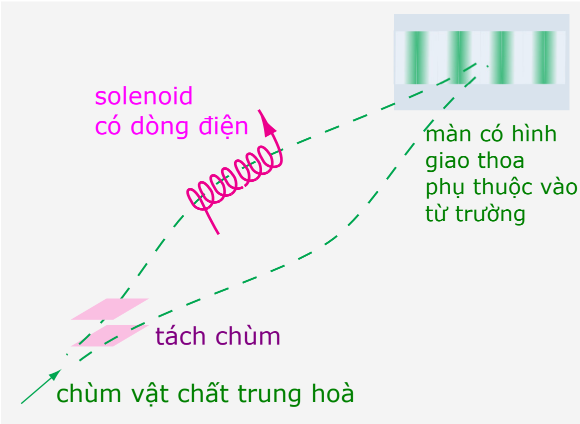
Phase lượng tử

Ta đã thấy *biên độ* của hàm sóng, biên độ xác suất, bộc lộ các hiệu ứng giống như một sóng: sự tán sắc và tắt dần. Bây giờ ta quay trở lại với *phase* của hàm sóng và tìm hiểu chi tiết hơn.

Trong khi rất dễ hình dung về biên độ của một hàm sóng – chỉ cần nghĩ về (căn bậc 2) của mật độ đám mây thực – thì phase cần nỗ lực hơn. Như đã nói, trạng thái hay hàm sóng là *các đám mây với một phase địa phương*: chúng là các đám mây các mũi tên quay, tức là, đám mây các vật thể quay và có thể bị quay. Trong trường hợp các đám mây thông thường, một chuyển động quay địa phương của các giọt nước không ảnh hưởng đến đám mây. Trái lại, trong Thuyết lượng tử, chuyển động quay địa phương của đám mây, tức sự biến đổi phase của nó, có ảnh hưởng đáng kể. Ta hãy tìm hiểu điều này.

Trang 58

Phase của sóng vật chất tự do hành xử giống như phase của photon: nó biến đổi theo thời gian và như vậy sẽ tăng lên dọc theo đường đi của hạt. Ta có thể hình dung phase



HÌNH 50 Từ trường làm thay đổi phase của một hạt đang quay.

là mũi tên nhỏ đang quay. Vận tốc góc của phase được tính theo công thức nổi tiếng $\omega = E/\hbar$. Tóm lại,

▷ Ta có thể hình dung hàm sóng của hạt lượng tử tự do như một đám mây các mũi tên chuyển động; các mũi tên quay với tần số không đổi trong khi đám mây tán sắc.

Điều chủ yếu ở đây, phase là một tính chất của hàm sóng dẫn tới hiện tượng giao thoa. Khi hai phần của hàm sóng tách ra và kết hợp lại sau một biến đổi phase tương đối, độ lệch pha sẽ xác định hình giao thoa. Đây là nguồn gốc của các hình giao thoa của các chùm electron mà ta thấy trong Hình 38. Không có phase lượng tử sẽ không có sự suy giảm và giao thoa.

Phase của một hàm sóng có thể bị ảnh hưởng theo nhiều cách. Cách đơn giản nhất là sử dụng điện trường. Nếu hàm sóng của một hạt *có điện tích* tách ra và cho đi qua vùng có điện trường sẽ tạo ra một độ lệch phase. Thí nghiệm được trình bày trong Hình 49. Sự biến thiên tuần hoàn của điện thế sẽ tạo ra sự dịch chuyển tuần hoàn của hình giao thoa. Người ta đã quan sát được điều này.

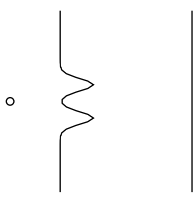
Một thí nghiệm đơn giản khác về phase được trình bày trong Hình 50: từ trường cũng làm thay đổi phase của một điện tích đang quay và ảnh hưởng đến trạng thái giao thoa.

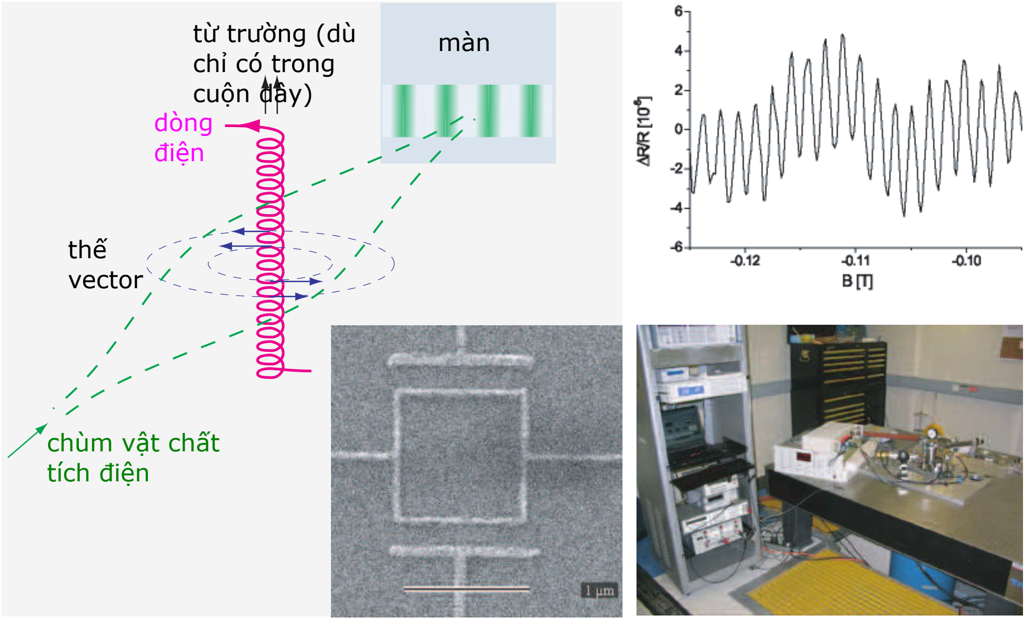
Một thí nghiệm nổi tiếng cho thấy tầm quan trọng của phase: *hiệu ứng Aharonov–Bohm*. Hiệu ứng này nổi tiếng vì 2 lý do: nó có tính phản trực giác và được tiên đoán trước khi người ta quan sát được nó. Hãy nhìn bộ dụng cụ trong Hình 51. Một sóng vật chất của các điện tích được tách làm hai bằng một hình trụ – đặt ở góc phải của đường đi của vật chất – và sóng vật chất tái hợp phía sau nó. Trong hình trụ có một từ trường; bên ngoài không có gì. (Một cách đơn giản để hình dung ra hình trụ đó là một solenoid dài.) Vật lý lượng tử tiên đoán là sẽ thấy hình giao thoa và vị trí của các vạch sẽ phụ thuộc vào giá trị của từ trường. Hiện tượng này xảy ra ngay cả khi sóng không vào vùng có từ trường! Người ta đã quan sát được hiệu ứng này trong vô số thí nghiệm.

Xem 57

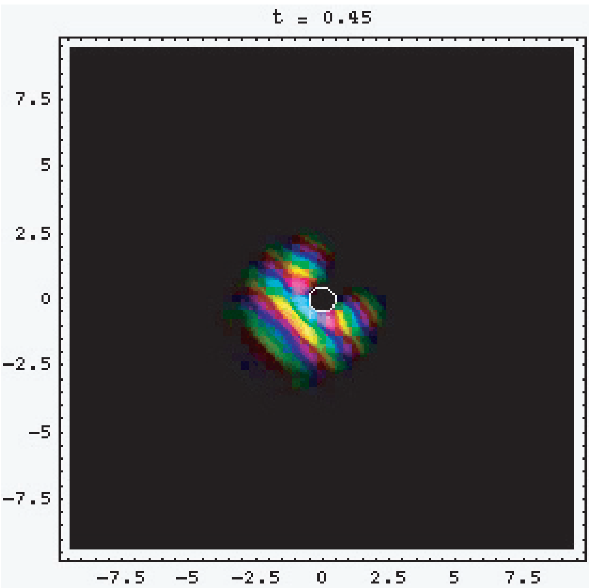
Giải thích cho hiệu ứng Aharonov–Bohm cũng đơn giản: đối với một điện tích, phase của hàm sóng được xác định bằng thế vector $\boldsymbol{A}$ chứ không phải là từ trường $\boldsymbol{B}$. Thế vector quanh một solenoid khác 0 – như ta đã biết trong phần Điện động lực học – nhưng đi

Quyển III, trang 84



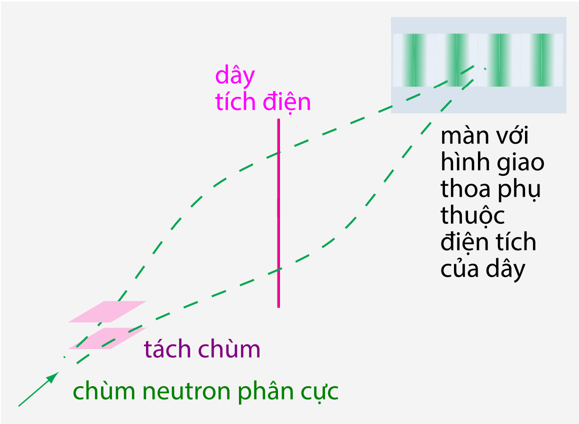


HÌNH 51 Hiệu ứng Aharonov–Bohm: ảnh hưởng của từ thế vector lên hiện tượng giao thoa (hình bên trái) và việc xác nhận số đo (hình bên phải), bằng cách sử dụng các mẫu đo vi mô để vận chuyển electron trong các dây kim loại mảnh (© Doru Cuturela).



HÌNH 52 Chuyển động của một hàm sóng bao quanh một solenoid cho thấy hiệu ứng Aharonov–Bohm. Mật độ trạng thái được hiển thị bằng cường độ sáng và phase địa phương được mã hoá thành màu sắc. (QuickTime film © Bernd Thaller)

vòng quanh solenoid. Điều này dẫn tới việc phân biệt hai mặt của solenoid và một độ lệch phase – thật ra nó phụ thuộc vào giá trị của từ trường – và như vậy sinh ra sự giao thoa, ngay cả khi các hạt không bao giờ tương tác với từ trường.



HÌNH 53 Hiệu ứng Aharonov–Casher: ảnh hưởng của điện tích lên phase làm cho giao thoa xảy ra ngay cả với các neutron.

Thêm một thí nghiệm về phase được gọi là *hiệu ứng Aharonov–Casher*, xảy ra cho cả các hạt trung hoà, miễn là chúng có moment từ, thí dụ như các neutron. Điện trường sẽ ảnh hưởng đến phase của một neutron *phân cực*, vì vậy thí nghiệm trong Hình 53 sẽ cho thấy một hình giao thoa phụ thuộc vào điện thế tác dụng.

Một thí nghiệm về phase khác được trình bày sau đây: trường hấp dẫn cũng có thể được sử dụng để quay các hàm sóng. Cả gia tốc do chuyển động quay cũng có thể làm được như vậy. Đúng ra người ta có thể đo chuyển động quay của Trái đất bằng cách quan sát sự thay đổi của các hình giao thoa của các chùm neutron.

Xem 58

Một lớp các thí nghiệm quan trọng về phase của hàm sóng là các hiện tượng lượng tử vĩ mô. Trong hiện tượng siêu dẫn và siêu chảy, phase của hàm sóng được điều khiển bằng từ trường và điện trường. Điều này có nhiều ứng dụng kỹ thuật quan trọng. Thí dụ như *hiệu ứng Josephson* được sử dụng để đo hiệu thế bằng cách đo tần số của sóng vô tuyến phát ra và *thiết bị giao thoa lượng tử siêu dẫn* hay SQID, được sử dụng để đo các từ trường rất nhỏ.

Ta cũng nên chú ý là tất cả các thí nghiệm này đều khẳng định rằng ta *không thể* đo được phase *tuyệt đối* của một hàm sóng. Tuy vậy, *phase tương đối* – độ lệch phase – thì *có thể* đo được. Bạn có thể chứng minh điều này không?

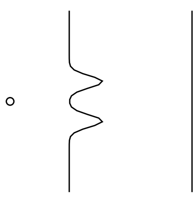
Câu đố 67 e

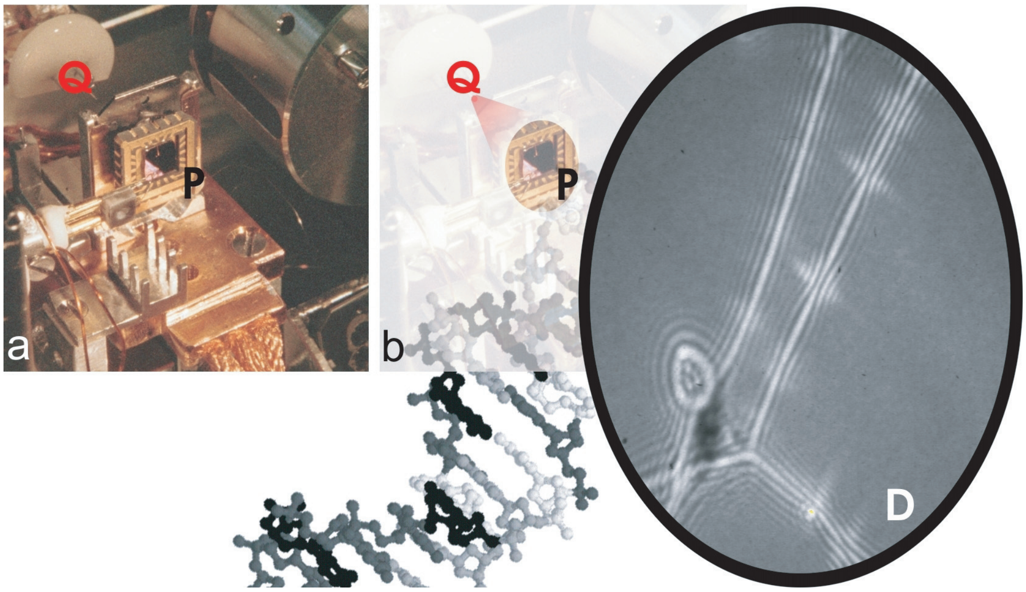
Mọi hiệu ứng dịch chuyển phase vừa trình bày đều đã được quan sát thấy trong nhiều thí nghiệm. Phase là một mặt cơ bản của hàm sóng: phase dẫn tới sự giao thoa và là lý do chính để ta nói đến nó đầu tiên khi nói về hàm *sóng*. Giống như trong một sóng bất kỳ, phase biến đổi theo thời gian và chịu ảnh hưởng của các yếu tố bên ngoài. Điều chủ yếu là các thí nghiệm chứng tỏ rằng một hạt lượng tử định xứ – khi sự trải rộng của hàm sóng có thể bỏ qua – được hình dung như một mũi tên quay là tốt nhất; trái lại, khi không thể bỏ qua sự trải rộng, thì hình dung hàm sóng như một sóng của các mũi tên quay tại mỗi điểm trong không gian là tốt nhất.

Hai chùm electron có thể giao thoa với nhau không? Có các chùm electron điều hợp không?

Có các nguồn electron điều hợp không? Đây là một câu hỏi phức tạp. Các kết quả trong tài liệu khoa học, như được minh hoạ trong Hình 54, cho thấy khả năng tạo ra toàn

Xem 59





HÌNH 54 Một toàn đồ điện tử của phân tử DNA (© Hans-Werner Fink/Wiley VCH).

đồ bằng các chùm electron.* Tuy vậy, khi người ta hỏi các tác giả này về ý nghĩa của sự điều hợp, họ trả lời rằng electron chỉ điều hợp ngang chứ không điều hợp dọc. Sự điều hợp ngang được xác định bằng kích thước khả hữu của mặt đầu sóng với phase đã cho. Giới hạn trên của kích thước này được cho bởi sự tương tác của một trạng thái với môi trường của nó. Điều này cần để có điều hợp thực sự.

Tuy vậy, khái niệm 'điều hợp ngang' là một định danh sai. Khả năng giao thoa với chính nó như đã hàm ý trong thuật ngữ 'điều hợp ngang' không phải là một định nghĩa điều hợp đúng. Điều hợp ngang, đối với photon hay các hạt vật chất, chỉ muốn nói tới kích cỡ nhỏ của nguồn hạt. Cả các đèn nhỏ (và laser) đều có thể giao thoa khi chùm ánh sáng được tách ra và hợp lại với chiều dài con đường như nhau; đây không phải là bằng chứng của sự điều hợp của trường ánh sáng. Lý luận tương tự chứng tỏ rằng tính đơn sắc cũng không phải là bằng chứng của sự điều hợp.

Một trạng thái được gọi là *điều hợp* nếu nó có một phase xác định trong cả một vùng không thời gian đã cho. Kích thước của vùng không gian hay khoảng thời gian xác định độ điều hợp. Kết quả của định nghĩa này là độ dài điều hợp có bậc cỡ kích thước của nguồn đối với các nguồn 'không điều hợp' nhỏ. Ngay cả với độ dài điều hợp nhỏ, kích thước của hình giao thoa hay khoảng cách d giữa các cực đại có thể lớn hơn độ dài điều hợp l hay kích thước nguồn s rất nhiều. Tóm lại, kích thước lớn (hay khoảng thời gian ổn định) của một hình giao thoa *không phải* là một bằng chứng của sự điều hợp.

Chúng ta hãy nhắc lại trường hợp ánh sáng. Một nguồn sáng điều hợp nếu nó tạo ra một sóng hình sin gần đúng trên một chiều dài hay trong một khoảng thời gian nào đó. Do hệ thức bất định, trong một chùm ánh sáng điều hợp bất kỳ, số photon không xác định. Một yêu cầu tương tự cũng áp dụng cho các chùm electron điều hợp: số electron không xác định là điều kiện cần cho sự điều hợp. Đây là điều không thể vì electron mang

Trang 48

Xem 60

* Năm 2002, toàn đồ đầu tiên đã được tạo ra bằng cách sử dụng các chùm neutron .

một điện tích không đổi. Không có chùm electron điều hợp.

Tóm lại, mặc dù electron có thể giao thoa với chính nó và dù có thể tạo ra sự giao thoa giữa hai nguồn sáng, hai nguồn electron không thể giao thoa với nhau. Thật vậy, chưa ai tạo ra được sự giao thoa giữa hai nguồn electron. Không có khái niệm quy ước về sự điều hợp của các chùm electron.

Nguyên lý tác dụng cực tiểu trong vật lý lượng tử

Trong thiên nhiên chuyển động xảy ra sao cho sự biến đổi ít nhất. Thật vậy, trong vật lý cổ điển, nguyên lý tác dụng cực tiểu – hay nguyên lý lười vũ trụ – phát biểu rằng: trong thiên nhiên, chuyển động của một hạt xảy ra dọc theo một đường đặc biệt – ngoài các quỹ đạo khả hữu có cùng các điểm đầu cuối – sao cho tác dụng cực tiểu. Nguyên lý lười/hiệu quả vũ trụ này, nếu phát biểu bằng toán học, là trong thiên nhiên *độ biến thiên* δS của tác dụng là zero. Sự cực tiểu hoá tác dụng/độ biến đổi giải thích cho mọi phương trình tiến hoá cổ điển. Bây giờ ta chuyển tư tưởng này sang lĩnh vực lượng tử.

Quyển I, trang 253

Đối với các hệ lượng tử, ta cần tái định nghĩa khái niệm tác dụng lẫn sự biến thiên: trước hết, ta phải tìm ra cách mô tả tác dụng dựa trên các toán tử; kế đến, ta cần định nghĩa độ biến thiên của tác dụng mà không có đường đi vì không có khái niệm 'đường đi' trong hệ lượng tử; thứ 3, vì có một tác dụng cực tiểu trong thiên nhiên, độ biến thiên bằng 0 không phải là một khái niệm được định nghĩa rõ ràng và ta phải vượt qua rào cản này. Có hai cách để làm được điều này: mô tả chuyển động của hệ lượng tử là sự chồng chập của mọi đường đi khả hữu, hay mô tả tác dụng nhờ sự giúp đỡ của hàm sóng. Hai cách tiếp cận này tương đương với nhau.

Trong cách tiếp cận đầu, *công thức tích phân đường*, chuyển động của một hạt lượng tử được mô tả như sự chồng chập một cách dân chủ của các chuyển động trên các đường đi khả hữu. (Trên kia ta gọi nó là 'mô hình mũi tên'.) Đối với mỗi đường đi, sự tiến hoá của mũi tên được xác định và ở điểm cuối, các mũi tên của tất cả các đường được cộng lại. Tác dụng trên mỗi đường là số vòng mà mũi tên thực hiện trên con đường đó. Kết quả con đường có xác suất cao nhất thường là con đường mà mũi tên quay ít nhất (nhưng không phải luôn luôn như vậy!). Nghiên cứu kỹ hơn cho ta thấy rằng các hệ vĩ mô, cổ điển luôn đi theo con đường có tác dụng cực tiểu, trong khi các hệ lượng tử thì đi theo mọi con đường.

Trang 58

Trong cách tiếp cận thứ hai, tác dụng được định nghĩa với sự giúp đỡ của hàm sóng. Trong vật lý cổ điển, ta định nghĩa tác dụng (hay sự biến đổi) là tích phân của Lagrangian giữa hai thời điểm đầu và cuối, Lagrangian là hiệu giữa động năng và thế năng. Trong vật lý lượng tử, định nghĩa đơn giản nhất là *tác dụng lượng tử* do Julian Schwinger định nghĩa. Ta hãy gọi trạng thái đầu và cuối của hệ là ψ_i và ψ_f. Tác dụng S giữa 2 trạng thái này được định nghĩa như sau

Quyển I, trang 248

$$S = \langle \psi_i \,|\, \int L \, dt \,|\, \psi_f \rangle \;, \qquad (39)$$

trong đó L là toán tử Lagrange. Ngoặc nhọn biểu diễn 'phép nhân' các trạng thái và các toán tử như đã định nghĩa trong Thuyết lượng tử.* Nói một cách đơn giản, cũng

* Ở đây ta bỏ qua các chi tiết về ký hiệu và toán học; trong cách mô tả đơn giản nhất, trạng thái là hàm sóng, toán tử tác dụng lên các hàm này và tích của 2 ngoặc khác nhau là tích phân của tích hai hàm trên cả

trong Thuyết lượng tử, tác dụng – sự biến đổi xảy ra trong một hệ – là tích phân của Lagrangian. Toán tử Lagrange L được định nghĩa giống như trong vật lý cổ điển: Lagrangian $L = T - V$ là hiệu giữa toán tử động năng T và toán tử thế năng V. Điểm khác nhau duy nhất là trong Thuyết lượng tử, *các biến* động lượng và vị trí của vật lý cổ điển được thay bằng các *toán tử* tương ứng của vật lý lượng tử. *

Để chuyển khái niệm độ biến thiên tác dụng δS sang lĩnh vực lượng tử, Julian Schwinger đã đưa ra biểu thức sau

$$\delta S = \langle \psi_{\mathrm{i}} \,|\, \delta \int L\,\mathrm{d}t \,|\, \psi_{\mathrm{f}} \rangle \; . \tag{40}$$

Không cần khái niệm đường đi trong biểu thức này vì độ biến thiên của tác dụng dựa trên sự thay đổi của hàm sóng thay vì đường đi của hạt.

Vì thiên nhiên có tính lười, yêu cầu cổ điển sau cùng cần chuyển sang lĩnh vực lượng tử là độ biến thiên của tác dụng phải = 0. Tuy vậy, trong lĩnh vực lượng tử, độ biến thiên của tác dụng không thể = 0, vì tác dụng cực tiểu có thể quan sát được là lượng tử tác dụng. Như Julian Schwinger đã khám phá, chỉ còn một cách phát biểu tính cực tiểu này là:

$$\delta S = \langle \psi_{\mathrm{i}} \,|\, \delta \int L\,\mathrm{d}t \,|\, \psi_{\mathrm{f}} \rangle = -i\hbar\, \delta \langle \psi_{\mathrm{i}} | \psi_{\mathrm{f}} \rangle \; . \tag{41}$$

Đây là *nguyên lý tác dụng lượng tử* mô tả mọi chuyển động trong lĩnh vực lượng tử. Theo quan niệm cổ điển, vế phải sẽ = 0 – vì $\hbar$ được xem là 0 – và ta phục hồi được nguyên lý tác dụng cực tiểu $\delta S = 0$ của vật lý cổ điển. Nhưng trong Thuyết lượng tử, khi ta cố gắng đạt tới những độ biến thiên nhỏ thì lại gặp lượng tử tác dụng và độ biến đổi (tương đối) của phase. Điều này đã được biểu diễn bằng vế phải của biểu thức. Vế phải là lý do các phương trình tiến hoá đối với các hàm sóng – phương trình Schrödinger trong trường hợp phi tương đối tính, không có spin, hay phương trình Dirac trong trường hợp tương đối tính, spin 1/2 – được nghiệm đúng trong thiên nhiên.

Nói cách khác, mọi chuyển động lượng tử – sự tiến hoá lượng tử của một trạng thái ψ hay $|\psi\rangle$ – xảy ra sao cho độ biến thiên tác dụng bằng $-i$ lần lượng tử tác dụng $\hbar$ nhân cho độ biến thiên của tích vô hướng giữa các trạng thái đầu và cuối. Nói một cách đơn giản, trong chuyển động thực, các trạng thái trung gian phải cố định, do sự đòi hỏi chúng phải dẫn từ trạng thái đầu tới trạng thái cuối, với số vòng quay hiệu dụng của phase trạng thái phải nhỏ nhất. Thừa số $-i$ biểu diễn sự phụ thuộc của tác dụng vào chuyển động quay của hàm sóng.

Tóm lại, nguyên lý tác dụng cực tiểu cũng đúng trong vật lý lượng tử, miễn là ta tính đến việc không thể tìm thấy các tác dụng nhỏ hơn $\hbar$ trong các thí nghiệm. Nguyên lý tác dụng cực tiểu chi phối sự tiến hoá của các hàm sóng. Như vậy Nguyên lý tác dụng cực tiểu giải thích cho màu sắc của mọi vật, cho mọi Khoa học vật liệu, Hoá học và Sinh học, như ta sẽ thấy sau đây.

không gian.

* Nói chính xác hơn, cũng có điều kiện chi phối thứ tự của các toán tử trong một tích hỗn hợp, tức là có tính đến tính không giao hoán của các toán tử. Ở đây ta không tìm hiểu vấn đề này.

Chuyển động của quanton có spin

> Mọi vật đều quay.
>
> Vô danh

Nguồn gốc của phase lượng tử là gì? Vật lý cổ điển có thể giúp ta trả lời câu này. Giống như các vật thông thường, quanton cũng có thể quay quanh một trục: ta đang nói về *spin* của hạt. Nhưng nếu các hạt lượng tử có thể quay, chúng sẽ có moment động lượng. Thí nghiệm đã chứng tỏ điều này.

Trang 84

Đặc biệt, electron có spin. Các chi tiết đầy đủ về spin của electron được suy ra từ các thí nghiệm của hai sinh viên Hoà Lan, George Uhlenbeck và Samuel Goudsmit, năm 1925. Họ đã can đảm công bố những điều mà Ralph Kronig đã nghi ngờ: electron quay quanh một trục mà hình chiếu của moment động lượng lên nó là $\hbar/2$. Đúng ra giá trị này – thường được gọi là spin 1/2 cho gọn – cũng đúng cho *mọi* hạt *vật chất* sơ cấp. (Trái lại, mọi hạt *bức xạ* sơ cấp đã biết đều có spin là $\hbar$, hay spin 1 cho gọn.)

Xem 61

Nếu một hạt đang quay có moment động lượng, ta có thể định hướng trục quay bằng cách tác dụng lên nó một moment lực, quan sát sự tiến động, truyền spin bằng va chạm v.v... Thật ra mọi hiệu ứng này đều đã được ghi nhận; thí dụ như thí nghiệm Stern–Gerlach đã cho thấy tất cả các điều đó. Sự khác biệt duy nhất giữa spin của hạt và moment động lượng cổ điển là spin của hạt thì được lượng tử hoá, như ta đã suy ra ở trên.

Trang 84
Trang 84

Nói cách khác, *spin* $\boldsymbol{L}$ của một hạt lượng tử có tất cả các tính chất của chuyển động quay quanh một trục. Kết quả, hạt lượng tử *tích điện* quay tròn có tác dụng như một nam châm lưỡng cực nhỏ, với nam châm định hướng dọc theo trục quay. Cường độ của nam châm lưỡng cực, là *moment từ*, tỷ lệ với spin và thừa số biến đổi $-e/2m_e$, giống như trong vật lý cổ điển. Do đó, đơn vị tự nhiên dành cho moment từ của electron là đại lượng $\mu_{\rm B} = e\hbar/2m_e$ được gọi là *magneton Bohr*. Hoá ra moment từ $\boldsymbol{\mu}$ của quanton hành xử khác với moment từ của các hạt cổ điển. Hiệu ứng lượng tử của spin được mô tả bằng *thừa số g*, có trị số là:

$$\boldsymbol{\mu} = g\frac{-e}{2m_e}\boldsymbol{L} = -g\mu_{\rm B}\frac{\boldsymbol{L}}{\hbar}\,, \quad \text{với} \quad \mu_{\rm B} = \frac{e\hbar}{2m_e}\,. \tag{42}$$

Từ các quang phổ quan sát được, Uhlenbeck và Goudsmit suy ra thừa số g là 2 đối với electron. Theo vật lý cổ điển, ta có $g = 1$. Giá trị thực nghiệm $g = 2$ được Llewellyn Thomas giải thích là do hiệu ứng tương đối tính, sau thí nghiệm này một vài tháng.

Trang 107
Xem 62

Vào năm 2004, kỹ thuật thí nghiệm đã trở nên nhạy đến mức người ta có thể phát hiện ra tác dụng từ của spin của một electron đơn lẻ, gắn liền với một tạp chất (trong một chất không có từ tính khác). Hiện nay các nhà nghiên cứu hy vọng sẽ phát triển được ‘kính hiển vi lực cộng hưởng từ’ có thể đạt tới độ phân giải nguyên tử.

Năm 1927, Wolfgang Pauli* đã khám phá ra cách bao gồm spin 1/2 trong việc mô tả cơ lượng tử: thay vì hàm trạng thái được mô tả bằng một số phức chỉ cần một hàm trạng

* Wolfgang Ernst Pauli (b. 1900 Vienna, d. 1958 Zürich), lúc 21 tuổi, đã viết một luận văn hay nhất về Thuyết tương đối đặc biệt và tổng quát. Ông là người đầu tiên tính được các mức năng lượng của hydrogen bằng Thuyết lượng tử, khám phá nguyên lý loại trừ, kết hợp spin vào Thuyết lượng tử, làm sáng tỏ mối liên hệ giữa spin và thống kê học, chứng minh định lý CPT và tiên đoán sự hiện hữu của neutrino. Ông được mọi người ngưỡng mộ vì sự thông minh và e ngại vì sự bình phẩm cay nghiệt, đã tạo cho ông biệt danh ‘lương tâm của vật lý’. Dù vậy ông đã giúp nhiều người trong việc nghiên cứu, như Heisenberg với Thuyết lượng

thái có *2* thành phần phức. Lý do của việc mở rộng này khá đơn giản. Nói chung, mũi tên nhỏ quay mô tả một trạng thái lượng tử *không* quay quanh một trục *cố định* như phương trình Schrödinger đã giả sử; *trục quay* cũng phải được xác định tại mỗi điểm trong không gian. Điều này dẫn tới việc ta cần 2 tham số bổ sung tại mỗi điểm trong không gian, tăng số tham số lên thành 4 số thực, hay là 2 số phức. Ngày nay, phương trình Pauli đối với cơ học lượng tử có spin, chủ yếu chỉ có lợi ích về mặt nhận thức, vì – giống như phương trình Schrödinger – nó không tương hợp với Thuyết tương đối đặc biệt.

Tóm lại, sự mô tả một quanton phi tương đối tính có spin kéo theo việc sử dụng hàm sóng có định rõ *2* số phức tại mỗi điểm trong không thời gian. Số phức bổ sung mô tả mặt phẳng quay địa phương của spin. Ý tưởng bao gồm mặt phẳng quay địa phương cũng đã được Dirac sử dụng khi ông mô tả một electron tương đối tính, và ý tưởng này cũng được sử dụng trong mọi phương trình sóng khác đối với các hạt có spin.

Phương trình sóng tương đối tính

Năm 1899, Max Planck đã khám phá ra lượng tử tác dụng. Năm 1905, Albert Einstein công bố Thuyết tương đối đặc biệt, đặt nền tảng dựa trên ý tưởng tốc độ ánh sáng c độc lập với tốc độ quan sát viên. Câu hỏi đầu tiên mà Planck đã tự hỏi là giá trị của lượng tử tác dụng có độc lập với tốc độ của quan sát viên hay không. Vì sự quan tâm này ông đã mời Einstein tới Berlin. Qua lời mời này, ông đã làm cho một nhân viên văn phòng cấp bằng phát minh nổi tiếng trong giới vật lý.

Các thí nghiệm chứng tỏ lượng tử tác dụng thực ra độc lập với tốc độ của quan sát viên. Mọi quan sát viên đều tìm thấy cùng một giá trị cực tiểu. Để kết hợp Thuyết tương đối đặc biệt vào Thuyết lượng tử, ta cần tìm ra Hamiltonian lượng tử H đúng, tức là, toán tử năng lượng đúng.

Đối với hạt tương đối tính tự do, hàm Hamilton cổ điển – nghĩa là, năng lượng của hạt – được cho bởi phương trình

$$H = \pm\sqrt{c^4 m^2 + c^2 \boldsymbol{p}^2} \quad \text{với} \quad \boldsymbol{p} = \gamma m \boldsymbol{v} \,. \tag{43}$$

Như vậy ta có thể hỏi: Toán tử Hamilton tương ứng đối với thế giới lượng tử là gì? Câu trả lời đơn giản nhất, 1949 đã được T.D. Newton và E.P. Wigner cung cấp và trong năm 1950, do L.L. Foldy và S.A. Wouthuysen. Toán tử gần như giống nhau:

Xem 64

$$H = \beta\sqrt{c^4 m^2 + c^2 \boldsymbol{p}^2} \quad \text{với} \quad \beta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} . \tag{44}$$

Xem 63

tử, mà không hề kể công. Ông đã được nhiều người, kể cả Einstein, nhìn nhận là một trí tuệ vĩ đại và sắc sảo của nền vật lý thế kỷ 20. Ông cũng nổi tiếng về 'hiệu ứng Pauli', tức là, khả năng kích khởi các thảm hoạ trong phòng thí nghiệm, cho máy móc và những người chung quanh chỉ bằng sự có mặt của mình. Như ta sẽ thấy sau đây, người ta có thể tranh cãi về việc có phải Pauli thực sự nhận giải Nobel vật lý năm 1945 – chính thức là do 'khám phá nguyên lý loại trừ' – vì đã trả lời được câu hỏi có bao nhiêu thiên thần khiêu vũ trên đầu một cây kim hay không.

Dấu xuất hiện trong toán tử matrix β phân biệt, như ta sẽ thấy, giữa các hạt và phản hạt. Các số +1 và −1 xuất hiện 2 lần, tương ứng với 2 hướng khả hữu của spin trong mỗi trường hợp.

Với toán tử Hamilton tương đối tính này đối với các hạt spin 1/2 – và với các hạt khác – hàm sóng được mô tả bằng *4* số phức, *2* cho các hạt và *2* cho các phản hạt. Tại sao? Ta đã thấy ở trên là một hạt lượng tử có spin đòi hỏi 2 thành phần phức cho mỗi trạng thái; điều này xuất phát từ yêu cầu cần xác định, tại mỗi điểm trong không gian, chiều dài mũi tên, phase của nó và mặt phẳng quay của nó. Trước kia ta cũng đã nhận thấy rằng Thuyết tương đối tự động khai sinh cho phản vật chất. Cả vật chất lẫn phản vật chất đều là một phần của việc mô tả tương đối tính các hiệu ứng lượng tử. Hàm sóng đối với một hạt có thành phần phản hạt triệt tiêu và ngược lại. Tóm lại, hàm sóng đối với hạt tương đối tính có spin 1/2 có *4* thành phần phức.

Trang 105
Quyển II, trang 74
Trang 192

Toán tử Hamilton cho ta toán tử vận tốc $\boldsymbol{v}$ tuân theo hệ thức giống như hệ thức trong vật lý cổ điển:

$$\boldsymbol{v} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{x} = \beta \frac{\boldsymbol{p}}{\sqrt{c^4 m^2 + c^2 \boldsymbol{p}^2}} \,. \tag{45}$$

Toán tử vận tốc này cho một continuum các trị riêng, từ trừ tới cộng c (tốc độ ánh sáng). Vận tốc $\boldsymbol{v}$ là một hằng số của chuyển động, giống như động lượng $\boldsymbol{p}$ và năng lượng

$$E = \sqrt{c^4 m^2 + c^2 \boldsymbol{p}^2} \,. \tag{46}$$

Moment động lượng quỹ đạo $\boldsymbol{L}$ cũng được định nghĩa giống như trong vật lý cổ điển là

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{x} \times \boldsymbol{p} \,. \tag{47}$$

Moment động lượng quỹ đạo $\boldsymbol{L}$ và spin $\boldsymbol{\sigma}$ là các hằng số chuyển động riêng biệt. Một hạt (hay phản hạt) với thành phần moment động lượng dương (hay âm) có một hàm sóng chỉ có một thành phần khác 0; 3 thành phần khác triệt tiêu.

Xem 65

Nhưng than ôi, cách mô tả chuyển động tương đối tính được đặt tên theo Foldy và Wouthuysen không phải là cách đơn giản nhất khi có tính đến tương tác điện từ. Sự đồng nhất đơn giản giữa hai mô tả cơ lượng tử và cổ điển sẽ bị mất khi bao gồm Điện từ học. Ta sẽ giải quyết vấn đề này sau đây, khi tìm hiểu phương trình tiến hoá của Dirac đối với các hàm sóng tương đối tính.

Trang 190

Chuyển động liên kết hay quanton phức hợp so với quanton sơ cấp

Khi nào thì một vật được xem là phức hợp, không phải là sơ cấp? Khi nó chứa chuyển động bên trong hay chuyển động liên kết. Khi nào ta gặp trường hợp này? Thuyết lượng tử cho ta nhiều câu trả lời thực tế.

Tiêu chuẩn đầu tiên của tính phức hợp có phần kỳ lạ: một vật phức hợp khi tỷ số hồi chuyển từ của nó khác với tỷ số do Điện động lực học lượng tử tiên đoán. *Tỷ số hồi chuyển từ* γ – đừng nhầm với thừa số giãn tương đối tính – được định nghĩa là tỷ số giữa

Xem 66
Trang 190

moment từ $\boldsymbol{M}$ và moment động lượng $\boldsymbol{L}$:

$$\boldsymbol{M} = \gamma \boldsymbol{L} . \tag{48}$$

Tỷ số hồi chuyển từ γ được đo bằng đơn vị $s^{-1}T^{-1}$, tức là, C/kg và xác định mức năng lượng của hạt quay trong từ trường; nó sẽ tái xuất hiện sau này trong ngữ cảnh phép chụp ảnh cộng hưởng từ. Mọi ứng viên cho các hạt sơ cấp đều có spin 1/2. Tỷ số hồi chuyển từ đối với các hạt spin-1/2 có moment từ M và khối lượng m có thể được viết như sau

Quyển V, trang 162

$$\gamma = \frac{M}{\hbar/2} = g\frac{e}{2m} . \tag{49}$$

Như vậy tiêu chuẩn để có thể là hạt sơ cấp rút gọn thành một điều kiện về giá trị của số không thứ nguyên g, được gọi là *thừa số g*. (Biểu thức $e\hbar/2m$ thường được gọi là *magneton* của hạt.) Nếu thừa số g *khác* với giá trị được Điện động lực học lượng tử tiên đoán đối với các chất điểm – cỡ 2.0 – thì vật là vật *phức hợp*. Thí dụ như ion $^4He^+$ helium có spin 1/2 và giá trị g bằng $14.7 \cdot 10^3$. Bán kính của ion helium là $3 \cdot 10^{-11}$ m, hiển nhiên là một trị hữu hạn và nó là một thực thể phức hợp. Đối với proton, ta đo được thừa số g khoảng 5.6. Thí nghiệm cho ta một bán kính proton hữu hạn khoảng 0.9 fm chứng tỏ rằng nó chứa nhiều thành phần.

Trang 190

Neutron, có moment từ mặc dù trung hoà về điện, nên phải là thể phức hợp. Thật vậy, bán kính của nó gần bằng với bán kính của proton. Tương tự, phân tử, núi non, ngôi sao và người phải là thể phức hợp. Theo tiêu chuẩn đầu tiên này, chỉ có các hạt sơ cấp là các *lepton* (electron, muon, tauon và neutrino), *quark* và *boson trung gian* (photon, W-boson, Z-boson và gluon). Ta sẽ tìm hiểu về các hạt này kỹ hơn trong chương về hạt nhân.

Quyển V, trang 162

Một tiêu chuẩn đơn giản khác của tính phức hợp là: *vật có kích thước đo được*. Tiêu chuẩn này cho ta một danh sách các hạt sơ cấp giống như lúc đầu. Thật vậy, hai tiêu chuẩn có liên hệ với nhau. Mô hình đơn giản nhất của các cấu trúc phức hợp tiên đoán rằng thừa số g nghiệm đúng phương trình

Xem 67

$$g - 2 = \frac{R}{\lambda_C} \tag{50}$$

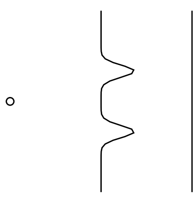
trong đó R là bán kính và $\lambda_C = h/mc$ là bước sóng Compton của hệ. Biểu thức này chính xác đến ngạc nhiên khi áp dụng cho ion helium-4, helium-3, tritium và proton và bạn có thể kiểm tra lại điều này. Các bảng trong Phụ lục 14 thuộc quyển kế tiếp cũng cho thấy như vậy. Tóm lại, tiêu chuẩn thứ hai của tính phức hợp tương đương với tiêu chuẩn đầu.

Quyển V, trang 342

Tiêu chuẩn ba của tính phức hợp thì tổng quát hơn: *vật phức hợp là vật lớn hơn bước sóng Compton của nó*. Một vật phức hợp là vật mà ta có thể phát hiện ra chuyển động *nội tại* của nó, tức là chuyển động của các thành phần. Tác dụng của một phần có khối lượng m_{part} chuyển động trong hệ phức hợp có kích thước r sẽ tuân theo hệ thức

$$S_{part} < 2\pi r\, m_{part}\, c < \pi r\, m\, c \tag{51}$$

trong đó m là khối lượng của vật *phức hợp*. Mặt khác, theo nguyên lý của Thuyết lượng



tử, tác dụng này, nếu quan sát được, phải lớn hơn $\hbar/2$. Thay vào điều kiện trên, ta tìm được *

$$r > \frac{\hbar}{2\pi m c} . \qquad (52)$$

Vế phải chỉ sai khác một hệ số $4\pi^2$ so với *bước sóng Compton*

$$\lambda = \frac{h}{m c} \qquad (53)$$

của vật đó. Như vậy một vật *lớn hơn* bước sóng Compton của nó là một vật phức hợp; một vật *nhỏ hơn* vế phải của biểu thức (52) là một hạt sơ cấp. Một lần nữa chỉ có lepton, quark và các boson trung gian đạt chuẩn. (Đối với các boson Higgs được khám phá năm 2012, thì chưa được kiểm tra nhưng người ta mong chờ nó cũng tuân theo tiêu chuẩn này.) Mọi vật khác đều là vật phức hợp. Tóm lại, tiêu chuẩn 3 cũng tạo ra một danh sách giống như trước. Bạn có thể giải thích lý do không?

Câu đố 68 e

Tiêu chuẩn thứ 4 của tính phức hợp thường được Steven Weinberg trích dẫn: một hạt là hạt sơ cấp nếu nó xuất hiện trong Lagrangian của mô hình chuẩn của vật lý hạt, tức là, trong mô tả các hạt xây dựng cơ bản của thiên nhiên. Bạn có thể chứng minh rằng tiêu chuẩn này được suy ra từ các tiêu chuẩn trước không?

Quyển V, trang 260
Câu đố 69 s

Điều thú vị là ta chưa kết thúc chủ đề này. Khi tính đến lực hấp dẫn thì các mệnh đề kỳ lạ hơn về tính phức hợp sẽ xuất hiện. Bạn chỉ cần kiên nhẫn thôi: điều này cũng đáng để tìm hiểu lắm.

Quyển VI, trang 313

Các câu đố vui và lạ về chuyển động lượng tử của vật chất

> Die meisten Physiker sind sehr naiv, sie glauben immer noch an wirkliche Wellen oder Teilchen.**
>
> Anton Zeilinger

Hãy tưởng tượng về một cạnh dao sắc hay một đầu kim nhọn: do lượng tử tác dụng ranh giới của chúng sẽ không thực sự bén nhọn mà là mờ giống như ranh giới một đám mây. Hãy tưởng tượng ra một vật cứng như kim cương hay một khối tungsten: do lượng tử tác dụng bề mặt của chúng sẽ không cứng. Mọi thí nghiệm đều xác nhận điều này. *Trong thiên nhiên không có gì thực sự bén nhọn hay cứng rắn.* Vật lý lượng tử sẽ không phù hợp với tư tưởng của các nhà nguyên tử học Hy Lạp.

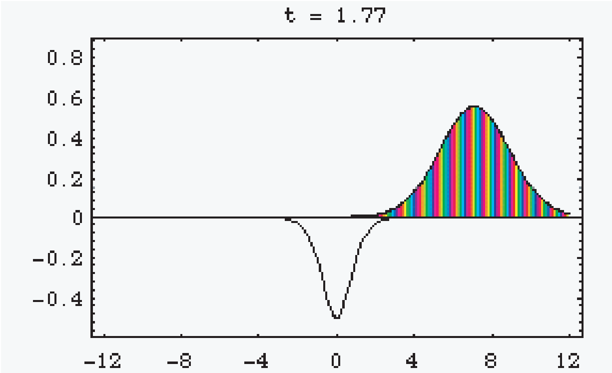
* *

Nguyên tử hydrogen có hiện hữu không? Nhiều loại nguyên tử đã được vẽ lại bằng kính hiển vi, chụp hình, nhấc lên và di chuyển từng hạt bằng đầu kim như hình Trang 344 trong quyển I. Các nhà nghiên cứu đã di chuyển từng nguyên tử bằng cách dùng các chùm laser để đẩy chúng. Tuy vậy, không có thí nghiệm nào trong số đó đã đo hay chụp

Xem 68

* Bạn có thể tìm ra thừa số 2 bị thiếu không? Và điều giả định thành phần phải luôn luôn nhẹ hơn vật phức hợp có đúng không?

** 'Phần lớn các nhà vật lý đều rất ngây thơ; họ hãy còn tin vào các sóng thật và hạt thật.' Anton Zeilinger, vật lý gia của đại học Vienna, nổi tiếng về các thí nghiệm trong Cơ học lượng tử.



HÌNH 55 Một giếng thế đặc biệt không làm nhiễu loạn một hàm sóng. Màu sắc dùng để biểu diễn phase. (QuickTime film © Bernd Thaller)

hình được nguyên tử hydrogen. Đó có phải là lý do để ta nghi ngờ sự hiện hữu của nguyên tử hydrogen hay không? Xem trọng lý luận không có gì quan trọng này có thể đem lại nhiều điều thú vị.

Câu đố 70 s

* *

Hàm sóng có 'thực' không? Nói chính xác hơn, hàm sóng có thực sự là một đám mây hay không? Một số vật lý gia vẫn còn nghi ngờ điều này. Nhóm vật lý gia đang lụi tàn này thường sinh ra vào khoảng giữa thế kỷ 20, đã nghe nhiều – những điều không đúng và từ những người có vấn đề – về sự không thực của các hàm sóng, đến nỗi họ không còn buồn hỏi và trả lời các câu hỏi đơn giản nhất. Để xua tan nghi ngờ của họ, bạn hãy hỏi họ rằng chúng có chiều cao hay không hay họ có nghĩ rằng nguyên tử có hình tròn hay không. Nếu họ đồng ý, họ đã thừa nhận rằng hàm sóng là một thực thể. Mọi vật thông thường được tạo thành từ các hạt sơ cấp nhỏ đến nỗi ta có thể coi chúng là chất điểm. Do đó, kích thước, diện tích bề mặt và thể tích của mọi vật thông thường hoàn toàn là do hàm sóng. Chiều dài, diện tích và thể tích là bằng chứng cho thấy hàm sóng là một loại thực thể.

* *

Hai biến động lực có thể thay thế nhau vì hai lý do khác nhau: hoặc chúng rất *giống nhau* – như toạ độ x và x^2 – hoặc chúng rất *khác nhau* – như toạ độ x và động lượng p_y. Bạn có thể giải thích cho điều này không?

Câu đố 71 d

* *

Toán tử tĩnh tiến không gian và thời gian thì giao hoán. Tại sao toán tử động lượng và Hamiltonian không giao hoán?

Câu đố 72 ny

* *

Có những thế đặc biệt *không* gây ảnh hưởng cho hàm sóng. Hình 55 cho thấy một thí dụ như vậy. Thế này có hệ số phản xạ là zero đối với mọi giá trị năng lượng; sóng tán xạ mà không có phần phản xạ. Nguyên do toán học cũng thú vị. Giếng thế có hình dạng của một soliton của phương trình Korteweg–de Vries; phương trình này có liên hệ với

phương trình Schrödinger.

* *

Một hệ liên kết bất kỳ trong trạng thái phi tương đối tính, không có moment động lượng, đều tuân theo hệ thức

Xem 69

$$\langle r^2 \rangle \langle T \rangle \geqslant \frac{9\hbar^2}{8m} , \tag{54}$$

trong đó m là khối lượng rút gọn và T là động năng của các thành phần, r là kích thước của hệ. Bạn có thể tìm ra kết quả này và kiểm chứng nó trong trường hợp hydrogen ở trạng thái cơ bản không?

Câu đố 73 s

* *

Trong trường trung học, để cho dễ hiểu, người ta thường hình dung các hàm sóng electron như một loại vật chất đặc biệt giống như lưu chất, gọi là *electronium*, có mật độ điện tích âm. Trong cách hình dung này, một nguyên tử là một hạt nhân dương được một đám mây electronium bao quanh. Làm biến dạng đám mây electronium quanh một hạt nhân cần có năng lượng; thí dụ như khi một photon có tần số thích hợp được hấp thu. Khi các nguyên tử cùng loại đến gần nhau, các đám mây electronium thường tạo ra các cầu nối vững chắc – các nối hoá học.

* *

Thuyết lượng tử cho phép có nhiều trạng thái liên kết khác thường. Thường thường ta vẫn nghĩ về các trạng thái liên kết như là các trạng thái có năng lượng thấp. Nhưng có những trường hợp các trạng thái liên kết có năng lượng cao do tác dụng của các thế dao động. Ta đã gặp một trường hợp như vậy trong vật lý cổ điển: con lắc dao động kích động thẳng đứng, ngược đầu, vẫn tiếp tục dao động mặc dù không ổn định. Trường hợp tương tự cũng xảy ra trong vật lý lượng tử. Các thí dụ: bẫy Paul, nguyên tử helium, ion âm, electron Trojan và máy gia tốc hạt.

Quyển I, trang 318
Xem 70

* *

Người ta thường nói rằng vũ trụ có thể đã được sinh ra từ một thăng giáng lượng tử. Bạn có thể giải thích lý do tại sao điều này vô nghĩa hay không?

Câu đố 74 s

Tóm tắt về chuyển động của quanton vật chất

Tóm lại, chuyển động của các quanton có khối lượng, tức là, các hạt vật chất lượng tử, có thể được mô tả theo hai cách:

- Ở mức được phóng đại, các hạt vật chất lượng tử được mô tả bằng các hàm sóng chuyển động giống như *các đám mây mũi tên vừa tiến động, vừa quay tròn và tiến tới.* Hướng của đám mây địa phương hay phase địa phương thì dao động. Bình phương hàm sóng, tức là mật độ đám mây là xác suất để tìm thấy hạt tại điểm đã cho.
- Nhìn từ xa, một hạt lượng tử có khối lượng chuyển động, hành xử như một mũi tên đơn lẻ vừa tiến động, vừa quay và tiến tới. Chuyển động quay và tiến động của mũi

> tên phụ thuộc vào năng lượng và động lượng của hạt và thế tác dụng. Mũi tên là biên độ xác suất: bình phương của chiều dài mũi tên là xác suất để quan sát được hạt. Nếu một hạt có thể đi từ một điểm đầu tới một điểm cuối qua nhiều đường thì biên độ xác suất sẽ là tổng biên độ xác suất của mỗi đường.

Mũi tên quay đơn lẻ là kết quả của việc tính trung bình của một đám mây. Mũi tên đơn lẻ bao gồm các tính chất hạt và sóng. Một vòng quay của mũi tên tương ứng với một lượng tử tác dụng $\hbar$. Tính chất quan trọng này hàm ý rằng một hạt phi tương đối tính có spin không đáng kể, sẽ tuân theo phương trình Schrödinger và một electron tương đối tính tuân theo phương trình Dirac. Phương trình Dirac phù hợp với mọi thí nghiệm đã biết. Đặc biệt, phương trình Dirac mô tả mọi điều về Khoa học vật liệu, Hoá học và Sinh học như ta sẽ thấy sau đây.

Để tiếp tục có hiệu quả nhất trên con đường tìm hiểu Vật lý lượng tử, ta sẽ tìm hiểu 3 chủ đề quan trọng: tính không phân biệt được của các hạt cùng loại, spin của các hạt lượng tử và ý nghĩa của xác suất.

Chương 5

Sự hoán vị của các hạt – hạt có giống với găng tay không?

Tại sao ta có thể phân biệt hai người sinh đôi? Tại sao ta có thể phân biệt những vật trông giống nhau, thí dụ như bản sao của một bản gốc? Phần lớn chúng ta đều tin rằng khi ta so sánh bản gốc với bản sao, ta có thể tìm thấy sự khác nhau. Niềm tin này hoá ra là cũng đúng trong lĩnh vực lượng tử nhưng kết luận không phải là hiển nhiên.

Hãy suy nghĩ về phương pháp cho phép bạn phân biệt các vật: bạn sẽ gặp khó khăn khi gặp các vi hạt. Do đó trong lĩnh vực lượng tử, khả năng của chúng ta phải chuyển biến để phân biệt được các hạt và các vật.

Câu đố 75 s

Ta có thể lập luận rằng luôn luôn có thể làm cho sự khác nhau giữa các vật thể gốc và các bản sao biến mất: chỉ cần sử dụng cùng một số lượng của cùng một loại nguyên tử là đủ. Đúng ra lượng tử tác dụng cho ta thấy rằng điều này chưa đủ mặc dù mọi nguyên tử cùng loại thực sự là các bản sao không thể phân biệt được! Trong phần sau đây ta sẽ tìm hiểu các hệ quả quan trọng nhất về mặt chuyển động của tính không phân biệt được của nguyên tử và các vật vĩ mô.

Sự phân biệt các vật vĩ mô

Một số tính chất quan trọng của vật thể sẽ nổi bật khi ta nghiên cứu bài toán tổ hợp: *bài toán găng tay*. Nội dung bài toán:

> Cần có bao nhiêu găng phẫu thuật (dành cho tay phải) để m bác sĩ giải phẫu cho w bệnh nhân, sao cho không ai phải tiếp xúc với bệnh phẩm của người khác?

Vấn đề tương tự cũng có thể gặp trong các tình huống khác. Thí dụ như máy tính, giao diện và virus máy tính hay condom, nam và nữ – lúc đó được gọi là *bài toán condom*. Cần nói rõ, số găng tay tối ưu *không phải là* tích mw. Đúng ra bài toán có 3 trường hợp.

Xem 71

Câu đố 76 s

- Trường hợp đơn giản $m = w = 2$ đã cung cấp các ý tưởng quan trọng cần có. Bạn có thể tìm ra lời giải và phương thức tối ưu không?
- Trường hợp $w = 1$ và m lẻ, lời giải là $(m+1)/2$ găng. Biểu thức tương ứng $(w+1)/2$ đúng cho trường hợp $m = 1$ và w lẻ. Đây là lời giải tối ưu và bạn có thể tự kiểm tra điều này.
- Một lời giải với một phương thức đơn giản cho mọi trường hợp được cho bởi công thức $\lceil 2w/3 + m/2 \rceil$ găng tay, trong đó $\lceil x \rceil$ có nghĩa là số nguyên nhỏ nhất lớn hơn hay bằng x. Thí dụ trường hợp 2 bác sĩ và 3 bệnh nhân thì chỉ cần 3 găng tay. (Tuy

Xem 72

vậy, công thức này không phải luôn luôn cho lời giải tối ưu; các giá trị tốt hơn nằm trong một số trường hợp nào đó.)

Câu đố 77 e

Hãy giải trí bằng bài toán này. Bạn sẽ tìm ra là có 3 tính chất cơ bản của găng tay để xác định lời giải. Đầu tiên, găng có 2 mặt, trong và ngoài, có thể phân biệt với nhau. Thứ 2, găng lộn mặt trong ra ngoài sẽ hoán đổi trái/phải và như vậy có thể phân biệt với các găng chưa đảo ngược. Thứ 3, găng có thể phân biệt với nhau.

Bây giờ ta trở lại mục tiêu ban đầu: Ba tính chất của găng có thể áp dụng cho các hạt lượng tử không? Ta sẽ tìm hiểu vấn đề tính chất 2 mặt của các hạt lượng tử trong phần cuối của cuộc hành trình. Câu hỏi là các hạt có thể lộn ngược hay không sẽ quan trọng đối với việc mô tả các hạt và chuyển động của chúng. Ta cũng sẽ tìm hiểu sự khác nhau giữa các hạt thuận tay phải/tay trái trong phần kế tiếp. Trong chương này ta tập trung vào vấn đề thứ 3, cụ thể là có thể phân biệt được vật và hạt với bản sao của chúng hay không. Ta sẽ thấy rằng các hạt *sơ cấp* không hành xử như găng tay – mà theo một cách kỳ lạ hơn.

Quyển VI, trang 114

Quyển V, trang 244

Trong đời sống hằng ngày, có thể phân biệt các vật vĩ mô bằng hai cách. Một mặt, ta có thể phân biệt vật – hay người – với nhau vì chúng có *các tính chất riêng* khác nhau, như khối lượng, màu sắc, kích thước hay hình dạng. Mặt khác, ta có thể phân biệt các vật dù chúng có tính chất riêng giống nhau. Trong trò chơi billiard ta thấy rằng bằng cách theo dõi đường đi của bi, ta có thể phân biệt được chúng. Tóm lại, ta có thể phân biệt các vật có tính chất giống nhau bằng cách sử dụng *trạng thái* của chúng.

Trạng thái của một viên bi bao gồm vị trí, động lượng và moment động lượng. Ta có thể phân biệt hai bi giống nhau vì sai số đo vị trí của mỗi bi nhỏ hơn kích thước bi. Trạng thái khác nhau của hai bi cho phép ta lần theo dấu vết của chúng. Tuy vậy, trong lĩnh vực vi mô, điều này không thể làm được! Ta hãy lấy 2 nguyên tử cùng loại. Hai nguyên tử như vậy có cùng tính chất riêng. Để phân biệt chúng khi va chạm, ta cần ghi nhận chuyển động của chúng. Nhưng do lượng tử tác dụng và hệ thức bất định, ta không thể làm được điều này. Thực ra một thí nghiệm đơn giản từ thế kỷ 19 cũng đã chứng tỏ rằng ngay cả thiên nhiên cũng không làm được điều đó! Kết quả khó hiểu này được khám phá khi ta nghiên cứu các hệ gắn liền với một số lớn các nguyên tử cùng loại va chạm với nhau: *chất khí*.

Sự phân biệt các nguyên tử

Quyển I, trang 401

Entropy của một chất khí là gì? Việc tính toán entropy S của một khí đơn giản, gồm N hạt đơn giản * có khối lượng m chuyển động trong thể tích V, cho ta công thức

$$\frac{S}{kN} = \ln\left[\frac{V}{\Lambda^3}\right] + \frac{3}{2} + \frac{\ln\alpha}{N} . \tag{55}$$

Ở đây, k là hằng số Boltzmann, ln là logarithm tự nhiên, T là nhiệt độ, và $\Lambda = \sqrt{2\pi\hbar^2/mkT}$ là bước sóng nhiệt (gần bằng bước sóng de Broglie của các hạt tạo nên khí). Trong kết quả này, số α bằng 1 nếu các hạt phân biệt được giống các viên billiard và bằng $1/N!$ nếu hoàn toàn không phân biệt được chúng. Việc đo entropy của một khí

Câu đố 78 e

* Hạt *đơn giản* nếu chúng được mô tả đầy đủ bằng động lượng và vị trí; nguyên tử là các hạt đơn giản. Phân tử không đơn giản, vì chúng còn được mô tả bằng hướng.



HÌNH 56 Willard Gibbs (1839–1903)

đơn giản cho phép ta xác định α và từ đó kiểm chứng thực nghiệm việc các hạt có phân biệt được hay không.

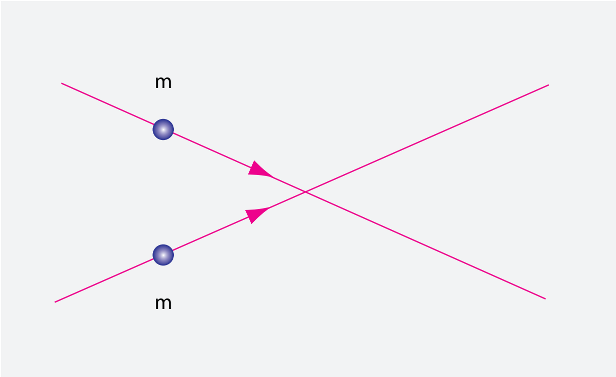
Hoá ra chỉ có trường hợp thứ 2, $\alpha = 1/N!$, là đúng với thiên nhiên. Ta có thể dễ dàng kiểm chứng điều này mà không cần đo đạc gì cả: chỉ trong trường hợp này entropy của 2 thể tích khí giống nhau *được cộng* lại.* Kết quả này thường được gọi là *nghịch lý Gibbs*,** chứng tỏ rằng các thành phần vi mô của vật chất *không phân biệt được*: trong một hệ các hạt lượng tử – chúng là electron, proton, nguyên tử và các phân tử nhỏ – không có cách để xác định từng hạt.

Câu đố 79 e

Xem 73

Tính không phân biệt được của các hạt là một tính chất thực nghiệm của thiên nhiên. Nó đúng tuyệt đối. Thí dụ như khi người ta khám phá ra hiện tượng phóng xạ, thì ai nấy đều nghĩ rằng nó mâu thẫn với tính không phân biệt được của nguyên tử vì sự phân rã hình như có tách riêng một số nguyên tử nào đó ra khỏi các nguyên tử khác. Nhưng Thuyết lượng tử lại chứng tỏ rằng điều này không đúng và cả nguyên tử lẫn phân tử đều không phân biệt được.

Vì $\hbar$ xuất hiện trong biểu thức của entropy, tính không phân biệt được là một hiệu ứng lượng tử. Thật vậy, ta không cần đến tính không phân biệt được nếu các hiệu ứng lượng tử có thể bỏ qua, như trường hợp các viên billiard. Tuy vậy, tính không phân biệt được lại quan trọng trong đời sống hằng ngày. Ta sẽ khám phá ra rằng các tính chất của vật chất thông thường – plasma, chất khí, chất lỏng và chất rắn – sẽ hoàn toàn khác nếu không có tính không phân biệt được. Thí dụ, nếu không có tính chất này thì dao kiếm không cắt được. Thêm nữa, đất không thể mang chúng ta; ta sẽ rơi xuyên qua mặt đất. Để làm sáng tỏ vấn đề này, ta sẽ tìm hiểu câu hỏi sau.



HÌNH 57 Các vật giống nhau có đường đi cắt nhau.

Tại sao trong thiên nhiên lại có tính không phân biệt được?

Lấy 2 hạt lượng tử có cùng khối lượng, cùng cấu tạo và hình dạng, như 2 nguyên tử cùng loại. Hãy tưởng tượng rằng quỹ đạo của chúng cắt nhau và chúng tiến đến rất gần nhau tại giao điểm, như đã thấy trong Hình 57. Thí dụ như trong chất khí, các nguyên tử va chạm hay suýt va chạm nhau. Hiện nay mọi thí nghiệm đã thực hiện đều chứng tỏ rằng khi khoảng cách nhỏ ta không thể xác định được là 2 quanton có đổi vai trò cho nhau hay không.

▷ Trong chất khí ta *không thể* theo dõi các hạt lượng tử và phân biệt từng hạt. Không thể lần theo dấu vết của các quanton va chạm.

Tính không thể phân biệt được của các hạt ở gần nhau là hệ quả trực tiếp của lượng tử tác dụng $\hbar$. Đối với 2 hạt đến rất gần nhau trên một con đường, việc đổi vai trò chỉ cần một độ biến đổi rất nhỏ, tức là chỉ một tác dụng (vật lý) nhỏ. Tuy vậy, ta đã biết rằng có một tác dụng quan sát được nhỏ nhất trong thiên nhiên. Để theo dấu các hạt lượng tử ở gần nhau ta cần những tác dụng *nhỏ hơn* lượng tử tác dụng. Lượng tử tác dụng sẽ làm cho ta không thể theo dấu các hạt lượng tử khi chúng đến rất gần nhau. Việc mô tả các hệ nhiều quanton phải tính đến việc sau khi chúng đến gần nhau thì ta không thể phân biệt được các quanton.

Nếu ta nhớ rằng Thuyết lượng tử mô tả các quanton như các đám mây, thì việc xuất hiện tính không phân biệt được là điều tự nhiên. Khi 2 đám mây gặp nhau rồi tách ra, ta không thể phân biệt 2 đám mây này. Mặt khác, nếu hai hạt ở xa nhau thì ta lại có một độ

Câu đố 80 d

* Thật vậy, entropy đo được từ thí nghiệm, đối với khí đơn nguyên tử, được cho bởi công thức Sackur–Tetrode

$$\frac{S}{kN} = \ln\left[\frac{V}{N\Lambda^3}\right] + \frac{5}{2} \tag{56}$$

có được khi ta đưa $\alpha = 1/N!$ vào phương trình trên. Công thức được vật lý gia Đức Otto Sackur (1880–1914) và vật lý gia Hoà Lan Hugo Tetrode (1895–1931) đưa ra một cách độc lập. Cần nhớ rằng tham số chủ yếu là tỷ số giữa V/N, thể tích hạt cổ điển và Λ^3, thể tích de Broglie của hạt lượng tử.

** Josiah Willard Gibbs (1839–1903), vật lý gia Mỹ là người cùng với Maxwell và Planck, là 3 nhà khoa học đặt nền tảng cho cơ học thống kê và nhiệt động lực học; ông đưa ra khái niệm *tập hợp* và thuật ngữ *phase nhiệt động lực*.

phân biệt hiệu dụng; như vậy tính không phân biệt được chỉ xuất hiện khi các hạt đến gần nhau.

Tóm lại, tính không phân biệt được là một hệ quả tự nhiên không tránh khỏi của giá trị tác dụng nhỏ nhất trong thiên nhiên. Kết quả này dẫn ta tới câu hỏi kế tiếp:

Ta có thể đếm được các hạt lượng tử không?

Trong đời sống hằng ngày, ta có thể đếm các vật thể vì ta có thể phân biệt được chúng. Vì lúc nào ta cũng không phân biệt được các hạt lượng tử nên ta cần thận trọng trong việc xác định cách đếm chúng. Bước đầu tiên trong việc đếm các hạt là việc xác định ý nghĩa của tình trạng không có hạt nào. Điều này có vẻ dễ thực hiện nhưng sau này ta sẽ gặp các tình huống mà bước đầu này sẽ gặp khó khăn. Trong mọi trường hợp, bước đầu tiên của việc đếm là *việc đặc tả chân không*. Phương pháp đếm nào cũng đều đòi hỏi phân biệt rõ ràng các tình trạng có hạt và không có hạt.

Bước thứ hai là đặc tả một biến động lực hữu dụng trong việc xác định số hạt lượng tử. Cách dễ nhất là chọn một trong các lượng tử số bảo toàn có thể cộng được, thí dụ như điện tích. Như vậy việc đếm sẽ được thực hiện bằng cách đo điện tích tổng rồi chia cho điện tích đơn vị.

Trong đời sống hằng ngày, trọng/khối lượng thường được dùng làm biến động lực. Tuy vậy, thường ta không thể sử dụng chúng trong lĩnh vực lượng tử, trừ trường hợp đơn giản. Khi số hạt lớn, năng lượng tương tác sẽ dẫn tới sai số. Khi số hạt rất lớn, năng lượng hấp dẫn cũng sẽ gây ra sai số. Nhưng điều chủ yếu là đối với hiện tượng chuyển tiếp, các hạt không bền hay thời gian đo ngắn, các số đo khối lượng sẽ đạt tới giới hạn. Nói tóm lại, dù việc đếm các nguyên tử bền bằng phép đo khối lượng sử dụng được trong đời sống hằng ngày, phương pháp này cũng không thể áp dụng cho mọi trường hợp, đặc biệt là các hạt có năng lượng lớn.

Việc đếm có nhờ đến các lượng tử số bảo toàn gặp nhiều thuận lợi. Trước tiên, ta sử dụng được trong hiện tượng chuyển tiếp, với các hạt không bền hay thời gian đo ngắn. Kế đến, ta không cần phân biệt các hạt mà vẫn đếm được. Thứ ba, ta không thể đếm các hạt ảo. Đây là một công việc thú vị, như ta sẽ thấy, vì đối với các hạt ảo, tức là các hạt mà đối với nó $E^2 \neq p^2c^2 + m^2c^4$, thì ta *không có cách nào* để xác định số lượng của chúng. Thực ra việc sử dụng một đại lượng bảo toàn có thể là một phương pháp đếm số hạt tốt nhất.

Quyển II, trang 74
Quyển V, trang 127
Quyển II, trang 74

Tác dụng phụ của việc đếm nhờ các lượng tử số là số các phản hạt sẽ âm! Hệ quả này cũng là kết quả của lượng tử tác dụng. Như ta đã thấy ở trên, lượng tử tác dụng bao hàm ý là ngay cả trong chân không, ta vẫn có thể quan sát được các cặp hạt–phản hạt nếu năng lượng đủ lớn. Kết quả một phản hạt phải đếm là -1 hạt. Nói cách khác, dù đếm cách nào thì vẫn có lỗi do tác dụng này. Trong đời sống hằng ngày giới hạn này không có ảnh hưởng gì vì không có phản hạt quanh ta. Tuy vậy khi năng lượng lớn thì vấn đề này trở nên quan trọng. Hoá ra không có một cách tổng quát để đếm chính xác số hạt và phản hạt riêng rẽ; ta chỉ có thể xác định tổng số hạt. Tóm lại, Thuyết lượng tử chứng tỏ rằng việc đếm số hạt không bao giờ hoàn hảo.

Tóm lại, thiên nhiên cung cấp cho ta cách đếm các hạt lượng tử ngay cả khi ta không thể phân biệt được chúng, nhưng chỉ trong đời sống hằng ngày, ở điều kiện năng lượng nhỏ. Do lượng tử tác dụng, số phản hạt sẽ âm. Như vậy phản hạt ra một giới hạn cho việc đếm các hạt ở năng lượng cao, khi sự tương đương năng–khối lượng trở nên quan

trọng.

Phép đối xứng hoán vị là gì?

Vì các hạt lượng tử có thể đếm được nhưng không thể phân biệt được nên có một phép đối xứng trong thiên nhiên dành cho các hệ gồm có nhiều quanton giống nhau. *Phép đối xứng hoán vị*, còn gọi là *phép đối xứng trao đổi*, là tính chất của thiên nhiên khiến cho các quan sát sẽ không đổi khi ta đổi chỗ các hạt giống nhau. Phép đối xứng hoán vị tạo thành một trong tứ trụ của Thuyết lượng tử, cùng với phép đối xứng không-thời gian, phép đối xứng chuẩn và phép đối xứng tái chuẩn hoá mà ta chưa nói tới. Phép đối xứng hoán vị là tính chất của các hệ *phức hợp*, tức là của các hệ được tạo thành từ các hệ con (đồng nhất). Tính không phân biệt được chỉ quan trọng đối với những hệ như vậy.

Nói cách khác, 'không phân biệt được' không giống như 'đồng nhất'. Hai hạt lượng tử cùng loại không *giống nhau*; chúng giống như bản sao chính xác của nhau hơn. Mặt khác, kinh nghiệm sống hằng ngày cho ta thấy rằng luôn luôn có thể phân biệt hai bản sao nếu xem kỹ, vì vậy thuật ngữ 'sao chép' chưa được thích hợp cho lắm.

▷ Quanton, hạt lượng tử có thể đếm được và hoàn toàn không thể phân biệt được.* Các hạt lượng tử là *các bản sao hoàn hảo* của nhau.

Vì là bản sao hoàn hảo nên ngay cả thiên nhiên cũng không phân biệt được các hạt; kết quả là phép đối xứng hoán vị xuất hiện.

Trong chương kế tiếp, ta sẽ tìm hiểu phép hoán vị như là phép quay một phần. Như vậy phép đối xứng hoán vị là phép đối xứng chịu tác động của chuyển động quay một phần. Bạn có thể tìm ra nguyên do không?

Câu đố 81 e

Tính không phân biệt được và sự đối xứng của hàm sóng

Tính không phân biệt được của các hạt lượng tử dẫn đến những kết luận quan trọng trong việc mô tả trạng thái chuyển động của chúng. Điều này xảy ra vì ta không thể thiết lập được một mô tả chuyển động bao gồm tính không phân biệt được ngay từ đầu. (Bạn có thể chứng minh điều này không?) Ta cần mô tả trạng thái của n-hạt có trạng thái $\Psi_{1...i...j...n}$ giả sử là có thể phân biệt được như đã được biểu thị bằng các chỉ số có thứ tự trong ký hiệu và ta sẽ giới thiệu tính không phân biệt được ngay sau đó.

Câu đố 82 s

Tính không phân biệt được, hay sự đối xứng hoán vị, có nghĩa là sự hoán đổi giữa hai hạt lượng tử bất kỳ xảy ra trong cùng một quan sát vật lý.** Hai trạng thái lượng tử có các tính chất vật lý như nhau nếu chúng khác nhau nhiều nhất là một thừa số phase; như vậy tính không phân biệt được đòi hỏi điều kiện

$$\Psi_{1...i...j...n} = e^{i\alpha}\, \Psi_{1...j...i...n} \tag{57}$$

* Từ 'không thể phân biệt được' dài đến nỗi nhiều vật lý gia nói bừa là các hạt 'đồng nhất'. Hãy thận trọng chỗ này.

** Do đó ta gặp phải tình trạng giống tình trạng mà ta đã gặp nhiều lần: *một đặc tả quá nhiều chi tiết của một mô tả bằng toán học*, ở đây là thứ tự rõ ràng của các chỉ số, sẽ *bao hàm một đối xứng của mô tả này*, mà trong trường hợp của chúng ta là một phép đối xứng chịu tác động của sự hoán đổi các chỉ số, tức là hoán đổi các hạt.

đối với một góc α chưa biết. Áp dụng 2 lần biểu thức này bằng cách hoán đổi các cặp chỉ số giống nhau, cho phép ta kết luận $e^{2i\alpha} = 1$. Điều này dẫn tới kết quả

$$\Psi_{1...i...j...n} = \pm \Psi_{1...j...i...n} , \qquad (58)$$

nói cách khác, một hàm sóng hoặc là *đối xứng* hay *phản đối xứng* khi ta hoán đổi các chỉ số. (Ta cũng có thể nói rằng trị riêng đối với toán tử hoán đổi thì bằng +1 hay −1.)

▷ Như vậy Thuyết lượng tử tiên đoán rằng các hạt lượng tử có thể không phân biệt được bằng một trong hai cách khác nhau.*

▷ Các hạt tương ứng với các hàm sóng *đối xứng* – là các hàm có dấu '+' trong phương trình (58) khi hoán đổi hạt – được gọi là** *boson*.

▷ Các hạt tương ứng với các hàm sóng *phản đối xứng* – là các hàm có dấu '–' trong phương trình (58) khi hoán đổi hạt – được gọi là*** *fermion*.

Thí nghiệm chứng tỏ rằng hành vi hoán đổi phụ thuộc vào *loại* hạt. Photon là boson. Mặt khác, electron, proton và neutron là fermion. Khoảng phân nửa nguyên tử được tìm thấy hành xử như boson (trong khoảng năng lượng vừa phải), nửa khác là fermion. Để xác định loại nguyên tử ta cần tính đến spin của electron và hạt nhân.

Đúng ra một phức hợp gồm một số *chẵn* fermion (năng lượng vừa phải) – hay một số bất kỳ boson (năng lượng bất kỳ) – hoá ra là một boson; một phức hợp gồm một số *lẻ* fermion (luôn luôn) là một fermion. Thí dụ như ^{4}He là một boson, ^{3}He là một fermion. Các đồng vị tự nhiên ^{23}Na, ^{41}K, ^{85}Rb, ^{87}Rb và ^{133}Cs cũng là các boson vì chúng có một số lẻ electron và nucleon; trái lại, ^{40}K và ^{134}Cs là các fermion (và trong trường hợp này cũng có tính phóng xạ).

Hành trạng của photon

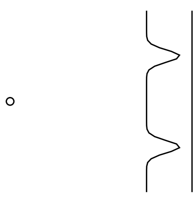
Một thí nghiệm đơn giản như trong Hình 58, cho phép ta quan sát được một đặc điểm quan trọng trong hành trạng của photon. Dùng một nguồn phát ra đồng thời 2 photon không phân biệt được, tức là 2 photon có tần số và phân cực như nhau. Do đó cặp photon này ở trong trạng thái liên đới với nhau. Trong phòng thí nghiệm, ta có thể tạo ra một

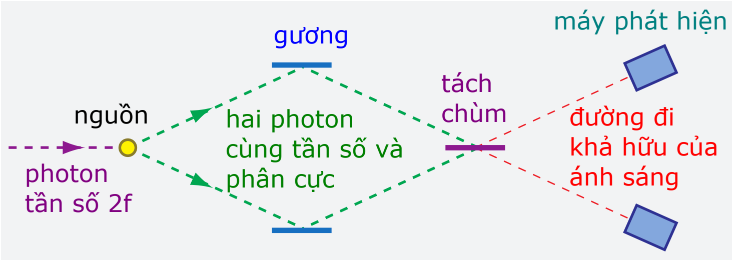
* Kết luận này áp dụng cho không gian 3 chiều. Trong không gian 2 chiều có nhiều khả năng hơn. Các khả năng như vậy, trong chừng mực nào đó, đã và đang là các chủ để nghiên cứu.

** 'Boson' là tên gọi theo tên vật lý gia Satyenra Nath Bose (b. 1894 Calcutta, d. 1974 Calcutta) người đầu tiên mô tả các tính chất thống kê của photon. Công trình đã được Albert Einstein mở rộng, vì vậy người ta gọi là thống kê Bose–Einstein.

Xem 74

*** Thuật ngữ 'fermion' xuất phát từ tên của vật lý gia được giải Nobel vật lý là Enrico Fermi (b. 1901 Rome, d. 1954 Chicago) nổi tiếng là một thiên tài bao gồm nhiều lĩnh vực trong Vật lý lý thuyết và thực nghiệm. Ông chủ yếu nghiên cứu về Vật lý hạt nhân và các hạt sơ cấp, spin và Thống kê học. Do công trình thực nghiệm của mình ông được gọi là 'kỹ sư lượng tử'. Ông cũng nổi tiếng nhờ các bài giảng vẫn còn được công bố dưới dạng viết tay và cách tiếp cận tài tình với các bài toán vật lý. Tuy vậy, giải Nobel vinh danh ông lại là một trong một số ít trường hợp mà giải thưởng lại được tặng thưởng cho một khám phá hoá ra là không đúng. Ông rời Italy vì những ngược đãi mà người vợ Do Thái của ông phải chịu đựng để di cư tới Mỹ. Fermi làm việc cho dự án Manhattan để tạo ra trái bom nguyên tử đầu tiên. Sau Thế chiến 2, ông đã tổ chức được một trong những khoa vật lý tốt nhất trên thế giới tại đại học Chicago, nơi mà ông được mọi đồng nghiệp ngưỡng mộ.





HÌNH 58 Phát xạ và giao thoa hai photon: hai photon không phân biệt được, luôn luôn đi cùng nhau đến cùng một máy dò.

nguồn như vậy bằng máy biến đổi hạ tần, giúp ta biến đổi một photon tần số $2f$ thành 2 photon tần số f. Hai photon liên đới, sau khi du hành qua một đoạn đường như nhau thì đi vào một dụng cụ tách chùm (thí dụ như một gương bán mạ) và đi ra theo hai phía. Hai máy phát hiện đặt ở hai lối ra của dụng cụ tách chùm. Các thí nghiệm chứng tỏ rằng cả hai photon luôn được phát hiện ở *cùng* một phía và không bao giờ đi theo hai hướng khác nhau. Điều này xảy ra vì sẽ có sự giao thoa suy giảm giữa hai photon truyền qua và phản xạ. (Lý luận đã đề cập ở trên cũng áp dụng ở đây: mặc dù liên quan đến 2 photon nhưng trong trường hợp này, khi nghiên cứu chi tiết, thì chỉ có một photon giao thoa với chính nó mà thôi.)

Xem 75

Trang 61

Thí nghiệm chứng tỏ rằng photon là các *boson*. Thật vậy, trong thí nghiệm tương tự thì fermion hành xử ngược lại; ta luôn phát hiện hai fermion ở hai phía *khác nhau*.

Xem 76

Co cụm và phản co cụm

Có một cách khác để kiểm tra vai trò hoán đổi của một hạt là thí nghiệm Hanbury Brown–Twiss đã được mô tả trước đây. Trước tiên, thí nghiệm đẹp đẽ này chứng tỏ rằng hạt lượng tử hành xử khác hạt cổ điển. Thêm nữa, so với các hạt cổ điển, fermion thì phản co cụm – do nguyên lý loại trừ Pauli – và boson thì co cụm. Hanbury Brown và Twiss thực hiện thí nghiệm với photon, tức là boson.

Trang 54

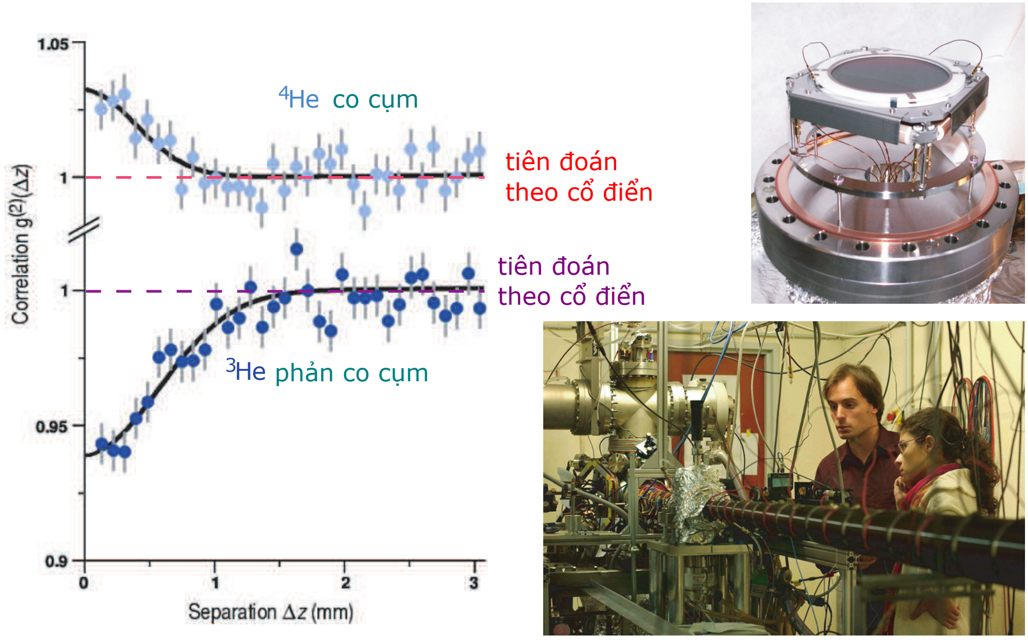
Năm 2005, chương trình hợp tác nghiên cứu Pháp–Hoà Lan đã thực hiện thí nghiệm với nguyên tử. Bằng cách sử dụng khí helium cực lạnh ở 500 nK và nguyên tắc máy dò thông minh, họ đã vẽ được đường cong tương quan điển hình của hiệu ứng. Kết quả, như thấy trong Hình 59, khẳng định rằng ^{3}He là một fermion ^{4}He là một boson, như đã tiên đoán từ quy tắc phức hợp của các hạt lượng tử.

Xem 77

Sự phụ thuộc vào năng lượng của phép đối xứng hoán vị

Nếu thí nghiệm buộc ta phải kết luận rằng không có ai, kể cả thiên nhiên, có thể phân biệt được hai hạt cùng loại thì ta có thể suy ra rằng chúng không thể được tạo thành từ hai loại khác biệt mà chỉ từ một loại. Cảm nhận ngây thơ và cổ điển của chúng ta về hạt như là một thực thể khác biệt với thế giới còn lại là một sự mô tả không đúng về hiện tượng 'hạt'. Thật vậy, không có thí nghiệm nào giúp ta theo dõi các hạt bằng các tính chất riêng giống nhau để có thể phân biệt chúng một cách rõ ràng. Điều này đã được kiểm chứng bằng thực nghiệm với mọi hạt sơ cấp, hạt nhân, nguyên tử và phân tử.

Điều này phù hợp với đời sống thông thường (tức là Vật lý cổ điển) như thế nào? Photon không làm chúng ta bận tâm cho lắm. Chúng ta hãy tập trung bàn luận về các



HÌNH 59 Sự co cụm và phản co cụm của nguyên tử ^{3}He và ^{4}He: kết quả đo, máy phát hiện và thí nghiệm (từ trang atomoptic.iota.u-psud.fr/research/helium/helium.html, hình của © Denis Boiron, Jerome Chatin).



HÌNH 60 Việc hình dung các hạt giống như các kích thích định xứ (hình bên trái) hay các đám mây (hình bên phải).

hạt vật chất. Ta đã biết là có thể phân biệt electron bằng cách chỉ ra dây điện mà nó chạy trong đó và ta có thể phân biệt tủ lạnh nhà mình với tủ lạnh nhà hàng xóm. Trong khi lượng tử tác dụng khiến cho ta không thể phân biệt được thì đời sống thông thường lại cho phép.

Cách giải thích đơn giản nhất là tưởng tượng một hạt vi mô, đặc biệt, một hạt sơ cấp, là một *chỗ phồng lên*, tức là một kích thích định xứ của chân không, hay là một đám mây nhỏ. Hình 60 cho thấy 2 chỗ phồng và 2 đám mây biểu diễn hạt. Điều hiển nhiên là nếu 2 hạt quá gần nhau thì việc phân biệt chúng là điều vô nghĩa vì ta không thể xác định được từng hạt. Hình ảnh chỗ phồng cho ta thấy nếu khoảng cách lớn hay tường thế ngăn chúng cao thì ta có thể phân biệt hai hạt giống nhau. Trong trường hợp đó, việc đo lường sẽ cho ta theo dõi các hạt hiện hữu một cách độc lập – như ta đã biết trong đời sống thông thường. Nói cách khác, ta có thể xác định giới hạn năng lượng tại đó sự đối xứng hoán vị của các vật/hạt cách nhau một khoảng d trở nên quan trọng. Giới hạn đó

là

$$E = \frac{c\,\hbar}{d}\,. \tag{59}$$

Bạn có thể chứng minh biểu thức này không? Thí dụ, ở nhiệt độ bình thường ta *có thể* phân biệt các nguyên tử bên trong một vật rắn vì năng lượng tính được lớn hơn nhiệt năng của nguyên tử rất nhiều. Để giải trí bạn hãy thử tính mức năng lượng để hai người sinh đôi giống nhau thực sự trở thành không phân biệt được. Việc ước tính mức năng lượng với các đối tượng thống kê là cây cối hay tủ lạnh sẽ trở nên dễ dàng.

Câu đố 83 e

Tóm lại, trong đời sống hằng ngày ta có thể phân biệt các vật và con người vì 2 lý do: được tạo thành từ *nhiều* phần và sống trong một môi trường có *năng lượng thấp*. Hình ảnh chỗ phồng của hạt cho ta hiểu một điều là chỉ có thể phân biệt các vật trong đời sống hằng ngày chứ đối với các hạt trong thế giới vi mô thì không thể.

Vấn đề năng lượng phát sinh thêm một điều cần bàn luận. Làm sao ta có thể mô tả fermion và boson trong khi có mặt các hạt hạt ảo và phản hạt?

Tính không phân biệt được trong Thuyết trường lượng tử

Thuyết trường lượng tử, như ta sẽ gặp trong quyển kế tiếp, chỉ đơn giản diễn tả ý tưởng chỗ phồng như đám mây của hình Hình 60 bằng ngôn ngữ toán học. Tình trạng không có chỗ phồng nào được gọi là *trạng thái chân không*. Thuyết trường lượng tử mô tả mọi hạt thuộc loại đã cho là *sự kích thích* của một trường đơn cơ bản. Các hạt không phân biệt được vì mỗi hạt là một kích thích của một tấm nền cơ bản và mỗi kích thích đều có các tính chất như nhau. Trạng thái của một hạt được mô tả bằng một *toán tử sinh* tác dụng lên một trạng thái của chân không. Việc thêm một hạt được mô tả bằng sự thêm vào một toán tử sinh và bớt đi một hạt là thêm vào một *toán tử huỷ*; toán tử sau hoá ra là toán tử phó của toán tử đầu.

Thuyết trường lượng tử nghiên cứu hành trạng của các toán tử sinh và huỷ để mô tả các điều quan sát được.* Ta có các kết luận sau:

— Các toán tử trường đối với các hạt có spin bán nguyên là các fermion và bao hàm tính phản giao hoán (địa phương).
— Các trường với spin nguyên là các boson và bao hàm tính giao hoán (địa phương).
— Đối với mọi toán tử trường gián cách kiểu không gian, giao hoán tử, phản giao hoán tử tương ứng, thì triệt tiêu.
— Phản hạt của fermion là fermion và phản hạt của boson là boson.
— Các hạt ảo, khi hoán đổi, hành xử giống như các hạt thực của chúng.

Các mối liên hệ này là nền tảng của Thuyết trường lượng tử. Chúng mô tả hành trạng của quanton dưới phép hoán vị.

* Khi hệ thức

$$[b, b^{\dagger}] = bb^{\dagger} - b^{\dagger}b = 1 \tag{60}$$

giữa hai toán tử sinh $b^{\dagger}$ và toán tử huỷ b được nghiệm đúng thì các toán tử này mô tả một *boson*. Dấu chữ thập được xem như là sự mô tả toán tử phó; hai chữ thập tương đương với không có chữ thập. Nếu các toán tử sinh và huỷ phản giao hoán

$$\{d, d^{\dagger}\} = dd^{\dagger} + d^{\dagger}d = 1 \tag{61}$$

thì chúng mô tả một *fermion*. Dấu ngoặc trên được gọi là *dấu ngoặc phản giao hoán tử*.

Nhưng tại sao các hạt lượng tử lại đồng nhất? Tại sao mọi electron lại đồng nhất? Khởi đầu từ thí nghiệm, Thuyết trường lượng tử mô tả các electron là các kích thích đồng nhất của chân không và đồng nhất về mặt cấu tạo. Dĩ nhiên là câu trả lời này chưa làm ta thoả mãn. Ta sẽ tìm thấy một câu trả lời tốt hơn trong phần cuối của cuộc hành trình lên đỉnh.

Tính đối xứng hoán vị đã được kiểm chứng một cách chính xác như thế nào?

Electron có phải là các fermion *hoàn hảo* không? Năm 1990, một thí nghiệm kiểm chứng hành trạng của fermion, đơn giản nhưng hiệu quả, đã được Ramberg và Snow thực hiện. Xem 78 Họ cho một dòng điện 30 A đi qua một dây đồng trong một tháng và tìm sự phát xạ tia X. Họ đã không tìm thấy điều gì. Họ kết luận rằng electron luôn ở trong trạng thái phản đối xứng, với thành phần đối xứng nhỏ hơn

$$2 \cdot 10^{-26} \tag{62}$$

của trạng thái toàn phần. Tóm lại, electron luôn ở trong trạng thái phản đối xứng: chúng là fermion.

Lý lẽ ẩn sau thí nghiệm đẹp đẽ này là: nếu electron không luôn luôn là fermion, mỗi electron có thể rơi vào mức năng lượng thấp nhất của nguyên tử đồng, dẫn tới sự phát xạ tia X. Việc không có các tia X như vậy dẫn tới việc electron là fermion với độ chính xác rất cao. Tia X chỉ có thể được phát ra nếu chúng là boson, trong khoảng thời gian nhỏ nhất. Thật vậy, 2 electron là fermion, không thể có cùng trạng thái lượng tử: điều ràng buộc này được gọi là *nguyên lý loại trừ Pauli*. Nó áp dụng cho mọi fermion và là chủ đề của chương kế tiếp.

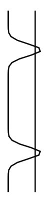
Bản sao, bản sao vật lý và găng tay

Các hệ cổ điển có tính không phân biệt không? Câu trả lời là có, đó là trường hợp các đại phân tử – miễn là chúng được tạo thành từ các đồng vị giống như nhau. Các hệ cổ điển *lớn*, được tạo thành từ một mole hay nhiều hạt hơn, có tính không phân biệt không? Câu hỏi đơn giản nhưng sâu sắc này đã đặt ra vấn đề là một hệ vật lý có thể có một bản sao *hoàn hảo* hay một *bản sao vật lý* hay không.

Ta có thể cho rằng đã có nhà máy sản xuất hàng loạt các sản phẩm, thí dụ như nút áo, kẹp giấy, nên ta có thể tạo ra các bản sao. Nhưng vấn đề không đơn giản như vậy. Xét kỹ ta sẽ thấy có điều khác nhau. Năm 1982, vật lý gia Hoà Lan Dennis Dieks độc lập với các vật lý gia Mỹ là Wootters và Zurek, đã công bố các bằng chứng đơn giản về việc không thể sao chép các hệ lượng tử. Đây là *định lý không thể nhân bản* nổi tiếng. Xem 79

Máy photo là một máy có thể dùng bản gốc, đọc các tính chất rồi sản xuất ra một bản sao mà không làm thay đổi bản gốc. Định nghĩa này hình như khá hiển nhiên. Tuy vậy ta đã biết rằng khi trích thông tin từ một bản gốc ta phải tương tác với nó. Kết quả là hệ sẽ thay đổi ít nhất là một lượng tử tác dụng. Như vậy, do Thuyết lượng tử, bản sao và bản gốc không bao giờ giống nhau.*

* Điều này hình như cho ta một giải pháp chống lại tiền giả. Đúng ra thì Stephen Wiesner đã đề nghị sử dụng Thuyết lượng tử và vào năm 1970, ông đã tưởng tượng ra việc sử dụng sự phân cực của các photon Xem 80



Thật ra Thuyết lượng tử chứng tỏ rằng không thể có máy photo. Một máy photo được mô tả bằng một toán tử ánh xạ một trạng thái của hệ gốc lên một trạng thái của bản sao. Nói cách khác, máy photo thì tuyến tính. Tính chất này dẫn tới một vấn đề. Nói một cách đơn giản, dù một máy photo có thể sao chép bản gốc ở trạng thái $|A\rangle$ hay $|B\rangle$, nó cũng không thể hoạt động được nếu trạng thái gốc là một trạng thái chồng chập $|A\rangle + |B\rangle$. Ta hãy xem lý do của việc này.

Máy photo là một thiết bị được mô tả bằng một toán tử U, làm thay đổi trạng thái ban đầu $|s\rangle_c$ của bản sao theo cách sau đây:

— Nếu bản gốc ở trong trạng thái $|A\rangle$, máy photo tác dụng lên bản sao $|s\rangle_c$ theo hệ thức

$$U|A\rangle|s\rangle_c = |A\rangle|A\rangle_c \,. \qquad (63)$$

— Nếu bản gốc ở trong trạng thái $|B\rangle$, máy photo tác dụng lên bản sao $|s\rangle_c$ theo hệ thức

$$U|B\rangle|s\rangle_c = |B\rangle|B\rangle_c \,. \qquad (64)$$

Kết quả, một bản gốc ở trong trạng thái $|A + B\rangle$ được máy photo xử lý thành

$$U|A + B\rangle|s\rangle_c = |A\rangle|A\rangle_c + |B\rangle|B\rangle_c \,. \qquad (65)$$

Điều này trái với điều ta muốn là

$$U_{\text{mong muốn}}|A + B\rangle|s\rangle_c = (|A\rangle + |B\rangle)(|A\rangle_c + |B\rangle_c) \,. \qquad (66)$$

Nói cách khác, máy photo không thể sao chép đầy đủ một trạng thái.* Đây là *Định lý không thể nhân bản*.

Tính bất khả của việc sao chép tiềm ẩn trong Thuyết lượng tử. Nếu ta có thể nhân bản các hệ thống thì ta đã có thể đo được một biến của một hệ và một biến khác trên bản sao của nó. Như vậy ta có thể vượt qua hệ thức bất định bằng 2 bản sao. Đây là điều không thể làm được. Tóm lại, các bản sao luôn luôn không hoàn hảo.

Việc thiếu máy photo cơ lượng tử là một điều khó chịu. Với một cái máy khoa học giả tưởng như vậy ta có thể đưa vào nó, thí dụ như một con sư tử và một con dê, để tạo ra một sự chồng chập: một quái thú mình dê đầu sư tử. Thuyết lượng tử chứng tỏ rằng những vật hay tình huống như vậy không thể trở thành hiện thực.

Lúc đó các nhà nghiên cứu khác sẽ tìm ra cách tiếp cận với một bản sao hoàn hảo, đặc biệt trong trường hợp các hệ cổ điển. Nói gọn lại, các nghiên cứu này cũng chứng tỏ rằng không thể sao chép hay nhân bản các hệ vĩ mô. Đơn giản là không có *máy sao chép*.

Xem 81

Câu đố 84 s

đơn lẻ lưu trữ các bit biểu diễn số sêri. Bạn có thể giải thích lý do mà ta không thể thực hiện được điều này không?

* Định lý không thể nhân bản đặt ra các giới hạn khắt khe cho các máy tính lượng tử, vì sự tính toán cần sao chép các kết quả trung gian. Định lý cũng cho thấy là không thể có sự truyền thông nhanh hơn ánh sáng trong các thí nghiệm EPR. Bù lại, ta có thể tạo ra được *kỹ thuật mã hoá lượng tử*, ít nhất là trong phòng thí nghiệm. Thật vậy, Định lý không thể nhân bản chứng tỏ rằng không ai có thể sao chép một thông điệp lượng tử mà không bị nhận ra. Hai phương thức đặc biệt vận dụng kết quả này trong kỹ thuật mật mã là giao thức Bennett–Brassard 1984 và giao thức Ekert 1991.

Nếu quan sát cẩn thận ta luôn luôn có thể phân biệt bản sao với bản gốc. Đặc biệt, đây là trường hợp bản sao sinh học; bản sao sinh học là các cặp sinh đôi giống nhau sinh ra từ các thai kỳ khác nhau. Chúng khác nhau về dấu vân tay, mống mắt, ký ức vật lý và tình cảm, cấu trúc não và nhiều phương diện khác. (Bạn có thể kể thêm vài mặt nữa không?) Như vậy, bản sao sinh học, giống như các cặp sinh đôi, không phải là bản sao của nhau.

Câu đố 85 s

Tóm lại, các vật quen thuộc như các bản photo, banh billiard hay các cặp sinh đôi luôn luôn có thể phân biệt được. Có 2 lý do: một, hiệu ứng lượng tử không đáng kể trong đời sống hằng ngày, vì vậy sự trao đổi không quan sát được không có gì nguy hiểm; hai, không có bản sao hoàn hảo của các hệ cổ điển, vì vậy luôn luôn có sự khác biệt rất nhỏ giữa 2 vật bất kỳ dù thoạt tiên trông chúng giống nhau. Găng tay, là các hệ cổ điển nên luôn luôn có thể phân biệt đước.

Tóm tắt

Do hệ quả của lượng tử tác dụng $\hbar$, các hạt lượng tử *không thể phân biệt được*. Điều này xảy ra theo một trong 2 cách: chúng là boson hay là fermion. Ngay cả thiên nhiên cũng không thể phân biệt được các hạt lượng tử giống nhau.

Dù có tính không phân biệt được, ta vẫn không thể sao chép trạng thái của một hệ vật lý thành một hệ thứ hai có cùng số hạt. Do đó, không thể có bản sao hoàn hảo trong thiên nhiên.

CHƯƠNG 6

CHUYỂN ĐỘNG QUAY VÀ THỐNG KÊ – LÀM RÕ KHÁI NIỆM SPIN

Spin là sự thể hiện việc các chùm vật chất có thể *bị phân cực*: các tia có thể bị quay. Như vậy spin mô tả hành trạng của các hạt khi quay và ta không thể xem chúng là các chất điểm đơn giản: các hạt lượng tử có thể quay quanh một trục. Chuyển động quay riêng này được gọi là *spin*; giống như chuyển động quay vĩ mô, spin được mô tả bằng moment động lượng.

Trang 105

Ta cũng nhắc lại rằng spin của quanton được lượng tử hoá theo đơn vị $\hbar/2$. Ta sẽ chứng minh một kết quả khó hiểu hơn: giá trị của spin xác định một hạt lượng tử và một hệ lượng tử bất kỳ, là boson hay fermion. Và ta cũng chứng minh rằng spin là chuyển động quay của quanton.

CÁC HẠT LƯỢNG TỬ VÀ SỰ ĐỐI XỨNG

Xem 82

Nền tảng tổng quát cho sự có mặt của spin đã được Eugene Wigner làm rõ vào năm 1939.** Ông bắt đầu bằng việc tóm lược rằng, một hạt lượng tử bất kỳ, nếu là *hạt sơ cấp*, phải hành xử như một *biểu diễn bất khả quy* của một tập hợp mọi phép biến đổi điểm quan sát. Tập hợp này tạo thành một nhóm đối xứng của không-thời gian phẳng, gọi là *nhóm Lorentz không thuần nhất*. Tại sao?

Quyển I, trang 266

Ta đã thấy trong quyển một của bộ sách này, sự đối xứng của một hệ phức hợp bất kỳ sẽ dẫn tới một số yêu cầu đối với các thành phần của hệ đó. Nếu các yêu cầu này không được thoả, các thành phần đó không thể tạo nên một phức hợp đối xứng.

Ta cũng đã biết từ đời sống thông thường và từ các thí nghiệm chính xác rằng mọi hệ vật lý đều đối xứng đối với phép tĩnh tiến trong thời gian và không gian, phép quay trong không gian, phép biến đổi Lorentz và – trong nhiều trường hợp – đối với phép phản xạ gương, sự hoán đổi vật chất–phản vật chất và sự đảo chiều chuyển động. Ta đã biết các đối xứng này qua đời sống hằng ngày; thí dụ như 'kinh nghiệm' chỉ là hệ quả của tính đối xứng của phép tĩnh tiến trong thời gian. Tập hợp các phép đối xứng thông thường này, hay chính xác hơn, các phép biến đổi đối xứng, được gọi là *nhóm Lorentz không thuần nhất*.

Các *phép đối xứng* này, tức là các phép biến đổi điểm quan sát, dẫn tới một số yêu cầu đối với các thành phần của các hệ vật lý, tức là đối với các hạt lượng tử sơ cấp. Theo ngôn ngữ toán học, ta nói rằng *các hạt sơ cấp* phải là *các biểu diễn bất khả quy* của nhóm đối xứng.

Quyển I, trang 266

** Eugene Wigner (b. 1902 Budapest, d. 1995 Princeton), nhà vật lý lý thuyết nhận giải Nobel vật lý năm 1963. Ông viết trên 500 bài báo, để cập đến nhiều phương diện khác nhau của sự đối xứng trong thiên nhiên. Ông cũng nổi tiếng là một vật lý gia lịch lãm trên thế giới.

Các sách giáo khoa về Thuyết lượng tử đều đề cập chi tiết và có hệ thống về lập luận này. Bắt đầu với nhóm Lorentz, người ta kiếm được một danh sách mọi biểu diễn bất khả quy khả hữu. Nói cách khác, người ta kiếm được một danh sách mọi cách hành xử khả hữu của các hạt sơ cấp. * Khi lập danh mục các khả năng, điều đầu tiên người ta tìm thấy là mọi hạt sơ cấp đều được mô tả bằng *động lượng 4 chiều* – đến đây chưa có gì mới lạ – bằng một moment động lượng nội tại là *spin* và bằng một tập hợp *các số chẵn lẻ*.

— Động lượng 4 chiều là kết quả của tính đối xứng tĩnh tiến của thiên nhiên. Số đo động lượng mô tả hành trạng của hạt đối với phép tĩnh tiến, tức là đối với sự dịch chuyển vị trí và thời gian của điểm quan sát. Độ lớn của động lượng 4 chiều là một bất biến, được cho bởi khối lượng, trong khi hướng của nó trong không gian thì có thể bất kỳ.

— Spin là kết quả của tính đối xứng quay của thiên nhiên. Số đo của spin mô tả hành trạng của vật đối với phép quay 3 chiều, tức là đối với sự đổi hướng quan sát.** Độ lớn của spin là một bất biến và nó có thể có nhiều hướng khác nhau tuỳ theo hướng chuyển động. Đặc biệt, spin của các hạt lượng tử có khối lượng hành xử khác với spin của các hạt lượng tử không khối lượng.

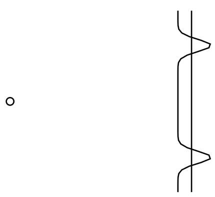
  Đối với hạt lượng tử *có khối lượng*, nhóm Lorentz không thuần nhất cho kết quả: độ lớn bất biến của spin là $\sqrt{J(J+1)}\hbar$, viết dưới dạng giản lược là J. Như vậy nó thường được đọc và viết là 'spin J' thay vì 'spin $\sqrt{J(J+1)}\hbar$' rườm rà. Vì lượng tử số J xác định độ lớn của moment động lượng, nó biểu diễn cho chuyển động quay của loại hạt đã đề cập. Tìm hiểu thêm ta sẽ thấy rằng lượng tử số spin J có thể là một bội số của 1/2, tức là nó có thể nhận giá trị 0, 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2, v.v... Như đã tóm tắt trong Bảng 4, thí nghiệm cho ta thấy rằng electron, proton và neutron có spin 1/2, các hạt W và Z có spin 1 và nguyên tử helium có spin 0. Ngoài ra, biểu diễn của J có thứ nguyên là $2J + 1$, có nghĩa là hướng của spin trong không gian có $2J + 1$ giá trị khả hữu. Đối với electron, với $J = 1/2$, có 2 giá trị; chúng thường được gọi là 'up' và 'down'. Như vậy spin chỉ có những giá trị *rời rạc*. Điều này khác với động lượng, có biểu diễn vô hạn chiều và các giá trị khả hữu nằm trong một khoảng *liên tục*.

  Các hạt lượng tử *không khối lượng* cũng được đặc trưng bằng các giá trị của spin. Nó có thể có cùng những giá trị như trong trường hợp hạt có khối lượng. Thí dụ như photon và gluon có spin 1. Đối với các hạt không khối lượng, biểu diễn có 1 chiều, vì vậy ta có thể mô tả chúng đầy đủ bằng *độ xoắn ốc*, là hình chiếu của spin lên hướng chuyển động. Độ xoắn ốc có thể dương hay âm, cũng thường được gọi là phân cực phải và phân cực trái. Không có các bậc tự do khác cho hướng của spin trong trường hợp hạt không khối lượng.

— Để hoàn chỉnh danh sách tính chất của hạt, ta phải kể luôn các phép đối xứng rời rạc của nhóm Lorentz không thuần nhất còn lại. Vì *phép nghịch đảo chuyển động*, *tính chẵn lẻ không gian* và *phép nghịch đảo điện tích* là các số chẵn lẻ nên mỗi hạt sơ cấp phải được mô tả bằng 3 số bổ sung là T, P và C, mỗi số chỉ có thể có giá trị +1 hay −1. Các số này phải được *nhân với nhau* để được giá trị của một hệ phức hợp.

* Để phù hợp về mặt vật lý với Thuyết lượng tử, các biểu diễn phải có tính *đơn nguyên*. Danh sách đầy đủ các biểu diễn *bất khả quy* và *đơn nguyên* của các phép biến đổi điểm quan sát cung cấp cho ta các khả năng để một hạt có thể được xem là hạt *sơ cấp*.

** Nhóm các phép quay vật lý còn được gọi là SO(3), vì về mặt toán học nó được mô tả bằng nhóm các matrix trực giao đặc biệt 3 x 3



BẢNG 4 Spin của hạt là đại diện của các nhóm quay.

Spin [$\hbar$]	Hệ không đổi sau khi quay	Hạt có khối lượng sơ cấp	phức hợp	Hạt không khối lượng sơ cấp
0	góc bất kỳ	boson Higgs	meson, hạt nhân, nguyên tử	không có [a]
1/2	2 vòng	e, μ, τ, q, ν_e, ν_μ, ν_τ	hạt nhân, nguyên tử, phân tử, gốc hoá học	không có, vì neutrino có khối lượng rất nhỏ
1	1 vòng	W, Z	meson, hạt nhân, nguyên tử, phân tử, lò nướng	photon γ, gluon g
3/2	2/3 vòng	không có [a]	baryon, hạt nhân, nguyên tử	không có [a]
2	1/2 vòng	không có	hạt nhân	'graviton' [b]
5/2	2/5 vòng	không có	hạt nhân	không có
3	1/3 vòng	không có	hạt nhân [c]	không có
v.v...[c]	v.v...[c]	v.v...[c]	v.v...[c]	có thể không có

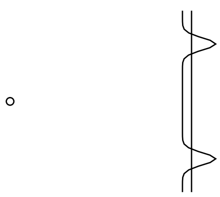
a. Siêu đối xứng, một phép đối xứng được giả định trong thế kỷ 20, tiên đoán các hạt sơ cấp trong ô này và các ô khác.
b. Ta chưa quan sát được Graviton.
c. Hạt nhân hiện hữu có spin lên tới ít nhất 101/2 và 51 (theo đơn vị $\hbar$). Xem 83

Tóm lại, bản chất đối xứng dẫn tới sự phân loại hạt lượng tử sơ cấp theo khối lượng, động lượng, spin và các số chẵn lẻ P, C, T.

Các loại hạt lượng tử

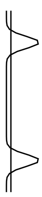
Spin của tất cả các hạt lượng tử trong thiên nhiên được cho trong Bảng 4. Tính chẵn lẻ và tất cả các tính chất riêng đã biết của các hạt sơ cấp được cho trong Bảng 5. Spin và các số chẵn lẻ được gọi chung là các *lượng tử số*. Mọi tính chất riêng khác của quanton đều liên quan tới sự tương tác, như khối lượng, điện tích hay spin đồng vị và ta sẽ tìm hiểu chúng trong quyển kế tiếp.

Quyển V, trang 162



BẢNG 5 Tính chất của hạt sơ cấp.

Hạt	Khối lượng m [a]	Thời gian sống τ hay độ rộng năng lượng,[b] kiểu phân rã chính	Spin đồng vị I, spin J,[c] số chẵn lẻ P, số chẵn lẻ điện tích C	Điện tích, spin đồng vị, số lạ,[c] số duyên, số đẹp,[d] số đỉnh: $QISCBT$	Số Lepton & số baryon [e] LB
Bức xạ sơ cấp (boson)					
photon γ	0 $(<10^{-53}$ kg)	bền	$I(J^{PC}) = 0, 1(1^{--})$	000000	0, 0
$W^{\pm}$	$80.398(25)\,\text{GeV}/c^2$	$2.124(41)$ GeV 67.60(27) % hadron, 32.12(36) % $l^+\nu$	$J = 1$	±100000	0, 0
Z	$91.1876(21)\,\text{GeV}/c^2$	$2.65(2)\cdot 10^{-25}$ s or $2.4952(23)\,\text{GeV}/c^2$ 69.91(6) % hadron, 10.0974(69) % l^+l^-	$J = 1$	000000	0, 0
gluon	0	bền	$I(J^P) = 0(1^-)$	000000	0, 0
Vật chất sơ cấp (fermion): lepton					
electron e	$9.109\,382\,15(45)\cdot 10^{-31}$ kg $= 81.871\,0438(41)\,\text{pJ}/c^2$ $= 0.510\,998\,910(13)\,\text{MeV}/c^2 = 0.000\,548\,579\,909\,43(23)$ u tỷ số hồi chuyển từ $\mu_e/\mu_B = -1.001\,159\,652\,1811(7)$	$> 13\cdot 10^{30}$ s	$J = \frac{1}{2}$	−100 000	1, 0
muon μ	$0.188\,353\,130(11)$ yg $= 105.658\,3668(38)\,\text{MeV}/c^2 = 0.113\,428\,9256(29)$ u tỷ số hồi chuyển từ $\mu_\mu/(e\hbar/2m_\mu) = -1.001\,165\,9208(6)$	$2.197\,03(4)\,\mu$s 99 % $e^-\bar{\nu}_e\nu_\mu$	$J = \frac{1}{2}$	−100000	1, 0
tau τ	$1.776\,84(17)\,\text{GeV}/c^2$	290.6(1.0) fs	$J = \frac{1}{2}$	−100000	1, 0
electron neutrino ν_e	$< 2\,\text{eV}/c^2$		$J = \frac{1}{2}$		1, 0
muon neutrino ν_μ	$< 2\,\text{eV}/c^2$		$J = \frac{1}{2}$		1, 0
tau neutrino ν_τ	$< 2\,\text{eV}/c^2$		$J = \frac{1}{2}$		1, 0
Vật chất sơ cấp (fermion): quark [f]					
up u	1.5 tới $3.3\,\text{MeV}/c^2$	xem proton	$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$	$+\frac{2}{3}+\frac{1}{2}0000$	$0, \frac{1}{3}$
down d	3.5 tới $6\,\text{MeV}/c^2$	xem proton	$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$	$-\frac{1}{3}-\frac{1}{2}0000$	$0, \frac{1}{3}$
strange s	70 tới $130\,\text{MeV}/c^2$		$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$	$-\frac{1}{3}0{-}1000$	$0, \frac{1}{3}$
charm c	$1.27(11)\,\text{GeV}/c^2$		$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$	$+\frac{2}{3}00{+}100$	$0, \frac{1}{3}$



BẢNG 5 (tiếp theo) Tính chất của hạt sơ cấp.

Hạt	Khối lượng m^a	Thời gian sống τ hay độ rộng năng lượng,[b] kiểu phân rã chính	Spin đồng vị I, spin J,[c] số chẵn lẻ P, số chẵn lẻ điện tích C	Điện tích, spin đồng vị, số lạ,[c] số duyên, số đẹp,[d] số đỉnh: $QISCBT$	Số Lepton & số baryon[e] $L\,B$
bottom b	$4.20(17)\,\mathrm{GeV}/c^2$	$\tau = 1.33(11)\,\mathrm{ps}$	$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$	$-\frac{1}{3}000{-}10$	$0, \frac{1}{3}$
top t	$171.2(2.1)\,\mathrm{GeV}/c^2$		$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$	$+\frac{2}{3}0000{+}1$	$0, \frac{1}{3}$
Boson sơ cấp đã quan sát được					
boson Higgs	$126\,\mathrm{GeV}/c^2$		$J = 0$		

Ghi chú:

a. Cũng nên xem thêm bảng các tiền tố SI ở Trang 207. Về đơn vị khối lượng eV/c^2, xem Trang 211.

b. *Độ rộng năng lượng* Γ của một hạt liên hệ với thời gian sống τ của nó theo hệ thức bất định $\Gamma\tau = \hbar$. Có một sự khác nhau giữa *chu kỳ bán rã* $t_{1/2}$ và thời gian sống τ của một hạt: chúng liên hệ với nhau theo công thức $t_{1/2} = \tau \ln 2$, với $\ln 2 \approx 0.693\,147\,18$; như vậy chu kỳ bán rã ngắn hơn thời gian sống. *Đơn vị khối lượng nguyên tử* thống nhất u được định nghĩa là 1/12 khối lượng một nguyên tử carbon 12 đứng yên, ở trạng thái cơ bản. Ta có $1\,\mathrm{u} = \frac{1}{12}m(^{12}\mathrm{C}) = 1.660\,5402(10)\,\mathrm{yg}$.

c. Để giữ cho bảng ngắn gọn, tiêu đề của nó không đề cập rõ ràng về *sắc tích*, bị gọi một cách rắc rối là, tích của tương tác mạnh. Người ta phải thêm nó vào danh sách các tính chất cơ bản của vật. Các lượng tử số chứa từ 'số chẵn lẻ' có nhân tính; tất cả các số khác có cộng tính. Số chẵn lẻ P và số chẵn lẻ điện tích C được viết là + hay –. Số chẵn lẻ thời gian T (đừng nhầm với số đỉnh T), tốt hơn nên gọi là số chẵn lẻ nghịch đảo chuyển động, bằng với CP trong mọi hạt đã biết. Spin đồng vị I (hay I_Z) xuất hiện 2 lần trong bảng; nó chỉ xác định đối với các quark up, down và các phức hợp của chúng, như proton và neutron. Trong sách khoa học người ta cũng tham chiếu đến số chẵn lẻ G, được định nghĩa là $G = (-1)^{IC}$.

Tiêu đề của bảng cũng không để cập tới *nhược tích* của các hạt. Chi tiết về nhược tích g, hay chính xác hơn, *spin đồng vị yếu*, là lượng tử số gán cho mọi fermion quay trái (và phản-fermion quay phải), nhưng không có fermion quay phải (và phản fermion quay trái), được cho trong phần nói về tương tác yếu.

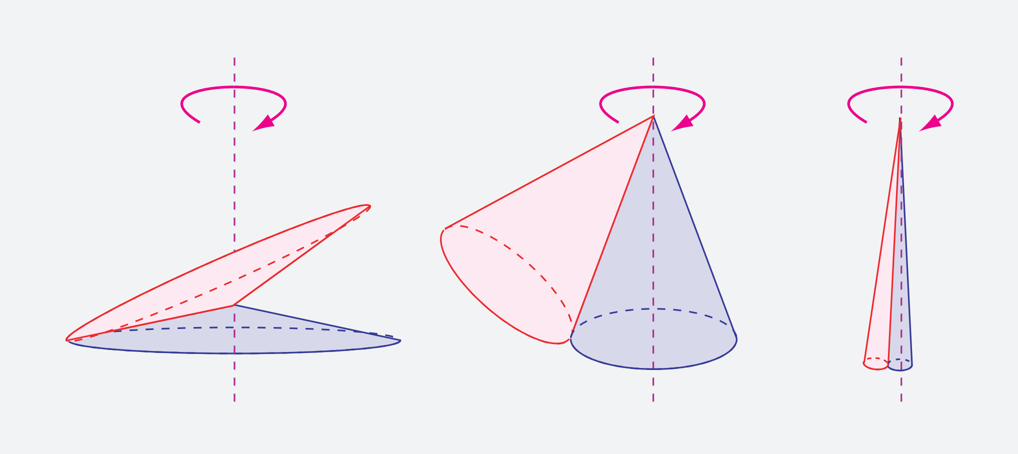
Quyển V, trang 244

d. 'Số đẹp' bây giờ thường được gọi là *số đáy*; tương tự, 'số thật' bây giờ thường được gọi là *số đỉnh*. Dấu của các lượng tử số S, I, C, B, T có thể được xác định bằng nhiều cách khác nhau. Trong phép gán tiêu chuẩn dưới đây, dấu của mỗi lượng tử số khác 0 được cho bởi dấu của điện tích của quark tương ứng.

e. Nếu có siêu đối xứng, số chẵn lẻ R sẽ phải được thêm vào cột này. Số chẵn lẻ R là một lượng tử số nhân tính, liên hệ với số lepton L, số baryon B và spin J qua công thức $R = (-1)^{3B+L+2J}$. Mọi hạt trong mô hình chuẩn đều có R chẵn, trong khi hạt đồng hành siêu đối xứng giả định của chúng sẽ có R lẻ. Tuy vậy, hiện nay thuyết này mâu thuẫn với thực nghiệm.

f. Để có định nghĩa và biết ý nghĩa chính xác của khối lượng của quark, hãy xem Trang 232 trong quyển V.





HÌNH 61 Minh hoạ để chứng minh phép quay một góc 4π tương đương với việc không quay (xem trong bài học).

Spin 1/2 và các vật bị ràng buộc

Một kết quả quan trọng của Thuyết lượng tử là spin 1/2 có thể có trong thiên nhiên, mặc dù giá trị này không xuất hiện trong đời sống hằng ngày. Một hệ có spin 1/2 có nghĩa là phép quay *2 vòng* tương đương với việc *không* quay gì cả, trong khi quay *1 vòng* thì không tương đương. Không có một hệ *đơn giản* nào hiện hữu trong đời sống hằng ngày có tính chất này nhưng những hệ như vậy lại có trong thế giới vi mô: electron, neutrino, nguyên tử bạc và các gốc phân tử đều có spin 1/2. Bảng 4 cho một danh sách mở rộng hơn.

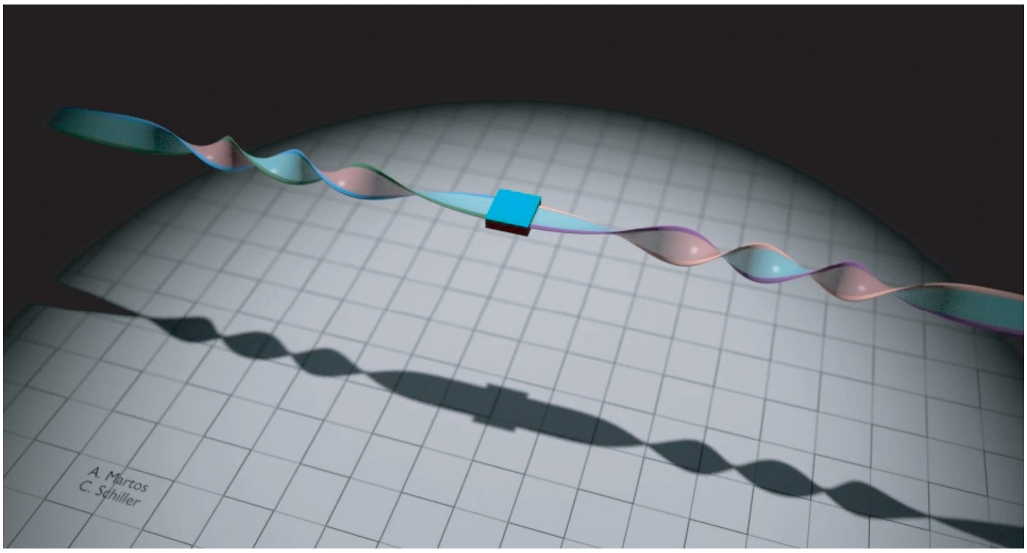
Quyển I, trang 50

Toán gia Hermann Weyl đã sử dụng một hình ảnh đơn giản để giải thích về phép quay 2 vòng tương đương với không quay, trong khi quay 1 vòng thì không. Lấy 2 hình nón, tiếp xúc với nhau tại đỉnh và dọc theo 1 cạnh, như trong Hình 61. Giữ yên một hình và quay hình kia quanh nó. Khi hình nón quay quanh trục thẳng đứng trở về đúng vị trí ban đầu, nó đã quay được một góc nào đó. Nếu hình nón lớn, như trong hình bên trái, góc quay sau cùng sẽ nhỏ. Giới hạn khi hình nón cực lớn là nó không quay chút nào cả. Nếu hình nón rất mảnh, như cây kim, hình nón đã quay (gần) 720 độ; trường hợp này giống như một đồng tiền quay quanh một đồng tiền thứ hai có cùng kích thước, cả hai cùng nằm trên bàn. Đồng tiền quay đã quay 2 vòng, tức là 720 độ. Cũng trong trường hợp này, góc quay sau cùng sẽ nhỏ. Kết quả 0 độ và 720 độ thì như nhau. Nếu ta tưởng tượng góc của hình nón thay đổi liên tục, thì ta sẽ thấy phép quay 0 độ liên tục thay đổi thành phép quay 720 độ. Trái lại, một phép quay 360 độ *không thể* 'hoàn tác' bằng cách này.

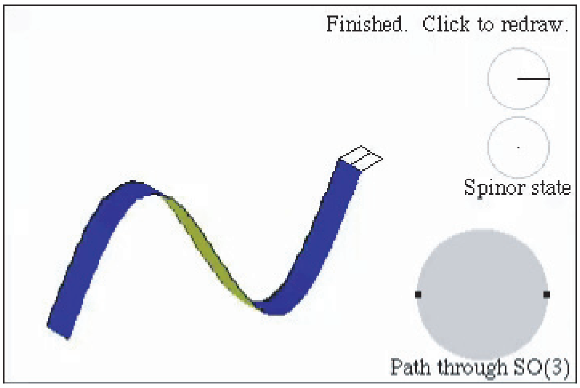
Câu đố 86 e

Có những hệ trong đời sống hằng ngày hành xử giống như có spin 1/2 nhưng chúng không đơn giản: tất cả những hệ như vậy đều *bị ràng buộc*. Hệ nổi tiếng nhất là một dây nịt. Hình 62 và Hình 63 chứng tỏ rằng phép quay cái khoá dây nịt một góc 4π tương đương với việc không quay: ta làm được điều này một cách dễ dàng nhờ di chuyển sợi dây nịt quanh cái khoá. Bạn có thể tự làm lại bằng cách sử dụng một dây nịt thật hay một băng giấy để nắm được thủ thuật này. Quá trình gỡ rối thường được gọi là *thủ thuật dây nịt*, *thủ thuật cái kéo*, *thủ thuật cái đĩa*, *thủ thuật sợi dây*, *bước nhảy rượu vang Philippine*

Câu đố 87 e



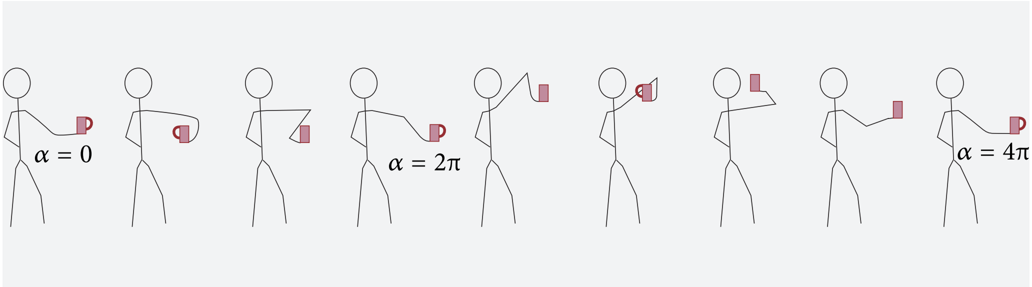
HÌNH 62 Giả sử ta không thấy dây nịt mà chỉ thấy vật hình vuông và nó biểu diễn cho 1 hạt. Film hoạt hình sẽ cho ta thấy một hạt như vậy (vật hình vuông) có thể trở lại vị trí ban đầu sau khi quay 4π (và không thể nếu góc quay là 2π). Một hạt 'bị buộc' như vậy thoả mãn tính chất của hạt có spin 1/2: quay nó một góc 4π tương đương với việc không quay. Dây nịt biểu diễn cho hàm sóng spinor; phép quay 2π tạo ra một sự xoắn; điều này đồng nghĩa với việc đổi dấu của hàm sóng. Một phép quay 4π không ảnh hưởng đến hàm sóng. Bạn có thể lặp lại thủ thuật này ở nhà với một băng giấy. Sự tương đương được trình diễn ở đây bằng 2 dây đai nhưng thủ thuật này có thể thực hiện được với một số dương dây đai bất kỳ! (QuickTime film © Antonio Martos)



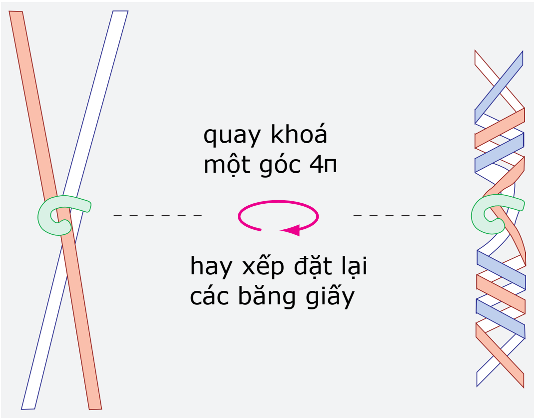
HÌNH 63 Thủ thuật dây nịt đơn: quay 2 vòng cái khoá của dây nịt tương đương với việc không quay. (QuickTime film © Greg Egan)

hay *đăng vũ Bali*. Nó thường được gán nhầm cho Dirac vì ông hay sử dụng nó trong bài giảng của mình.

Thân thể con người cũng có sẵn một dây nịt như vậy: *cánh tay*. Chỉ cần đặt lên bàn tay một vật thí dụ như một cái tách và quay bàn tay cùng với vật một góc 2π bằng cách uốn cánh tay. Sau lần uốn thứ hai cả hệ trở lại như cũ như ta thấy trong Hình 64. Thủ



HÌNH 64 Cánh tay người là một mô hình có spin 1/2.



HÌNH 65 Thủ thuật dây nịt tổng quát hoá, mô hình hành trạng của hạt có spin 1/2 đối với phép quay: độc lập với số băng giấy, ống, dây được cột vào vật, hai trạng thái có thể biến đổi qua lại bằng cách quay vật trung tâm một góc 4π hay giữ yên vật trung tâm và di chuyển các băng giấy quanh vật đó.

thuật sẽ gây ra ấn tượng mạnh hơn khi ta sử dụng *nhiều* cánh tay. Bạn có thể đặt 2 bàn tay (nếu chọn vị trí khởi đầu đúng) dưới cái tách hay bạn có thể cùng một hay 2 người bạn cầm vào cái tách. Thủ thuật dây nịt vẫn có thể thực hiện được và cả hệ sẽ được gỡ rối sau 2 vòng quay.

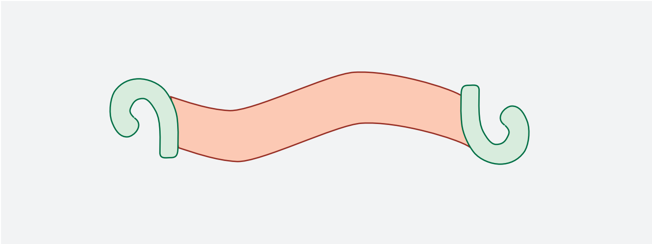
Câu đố 88 e

Câu đố 89 e

Điều này dẫn ta đến một cách tổng quát nhất để chứng minh mối liên hệ giữa sự ràng buộc và spin 1/2. Chỉ cần dán một số bất kỳ các sợi dây, dây đai hay ống, cụ thể là dài nửa mét, vào một số vật, như trong Hình 65. (Với nhiều đuôi như vậy mà gọi nó là một cái khoá dây nịt thì không còn thích hợp nữa.) Mỗi băng giấy được giả sử là dài tới vô cực và được cột vào đó. Thay vì vô cực ta cũng có thể tưởng tượng các băng giấy cột vào một vật cố định ở xa, như cánh tay buộc vào cơ thể. Nếu vật, biểu diễn cho hạt, quay đi một góc 2π, các xoắn sẽ xuất hiện. Nếu vật được quay thêm một vòng nữa, tổng cộng là 4π, ta có thể làm cho mọi chỗ xoắn và rối biến mất mà không cần di chuyển hay quay vật. Bạn phải tự trải nghiệm điều này để có lòng tin. Và ta có thể thực hiện quá trình này với số băng giấy *bất kỳ* dán vào vật. Website www.evl.uic.edu/hypercomplex/html/dirac.html có một film hoạt hình trình diễn quá trình này với 4 dây đai.

Tóm lại, tất cả các film hoạt hình này chứng tỏ rằng dây nịt+khoá, và đúng ra thì mọi hệ bị ràng buộc một cách thích hợp, đều trở lại trạng thái nguyên thuỷ chỉ sau một phép quay 4π, và *không* trở lại nếu quay một góc 2π. *Các vật bị ràng buộc hành xử như các hạt có spin 1/2.* Thật ra các vật bị ràng buộc như dây nịt và khoá là các hệ *duy nhất* mô phỏng lại các tính chất của spin 1/2. Trong phần cuối của cuộc thám hiểm ta sẽ khám phá lý do

Câu đố 90 e



HÌNH 66 Hai khoá nối với nhau bằng một dây nịt, một cách để ta hình dung ra hai hạt spin 1/2.

ẩn tàng của sự tương đương giữa hạt có spin 1/2 và hệ bị ràng buộc.

Qua việc tìm hiểu tính đối xứng của hàm sóng, Thuyết lượng tử chứng tỏ rằng phép quay *đòi hỏi* mọi hạt lượng tử phải có spin. Việc nghiên cứu hàm sóng cho ta thấy rằng hành vi của các hạt vật chất sơ cấp đối với phép quay giống như các vật bị ràng buộc. Một hàm sóng, bị ràng buộc hay liên đới, phải có dấu âm.

Tóm lại, Thuyết lượng tử dẫn đến sự hiện hữu của spin 1/2 có phần phản trực giác, đặc biệt đối với các hạt vật chất sơ cấp.

Sự mở rộng của thủ thuật dây nịt

Trang 136

Nhưng tại sao các thí nghiệm đều chứng tỏ rằng mọi fermion đều có spin bán nguyên và mọi boson đều có spin nguyên? Đặc biệt, tại sao electron lại tuân theo nguyên lý loại trừ Pauli? Thoạt tiên, ta không rõ giá trị của spin phải như thế nào khi hạt có tính thống kê. Đúng ra có nhiều cách để chứng tỏ rằng phép quay và Thống kê học có liên hệ với nhau. Chứng minh đầu tiên là của Wolfgang Pauli, người đã sử dụng đến lý thuyết trường lượng tử và nó phức tạp đến nỗi các phần cốt yếu của nó được giấu đi. Phải mất nhiều thập niên để mọi người tin rằng phần chính của việc chứng minh chỉ là quan sát kỹ các dây nịt.

Xem 86

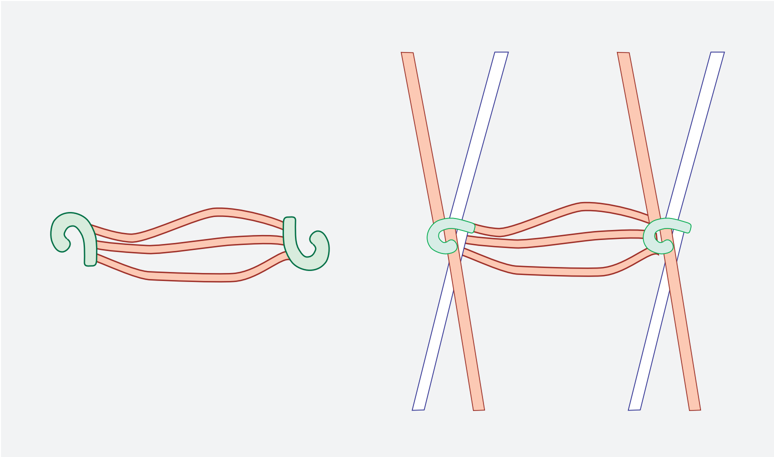
Trang 121

Bắt đầu từ mô hình chỗ phồng của các hạt lượng tử như ta thấy trong Hình 60, ta có thể tưởng tượng ra một ống nối với 2 hạt, tương tự như dây nịt nối với 2 khoá, như trong Hình 66. Khoá biểu diễn cho hạt. Ống để theo dõi hướng tương đối của chúng. Nếu một hạt/chỗ phồng quay đi một góc 2π dọc theo một trục bất kỳ, dây nịt sẽ bị xoắn. Như ta vừa chứng minh, nếu khoá đó quay thêm 2π, góc quay tổng cộng là 4π, chỗ xoắn kép vừa nảy sinh có thể được hoàn tác một cách dễ dàng mà không cần phải di chuyển hay quay các cái khoá.

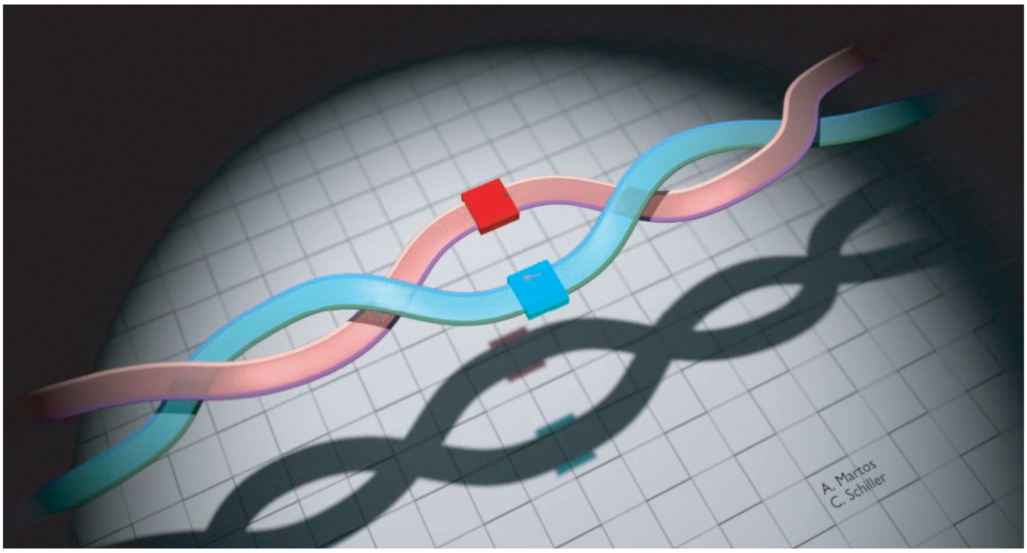
Bây giờ ta lại nhìn vào Hình 66. Nếu ta lấy hai khoá và đơn giản *hoán đổi* vị trí của chúng, dây nịt nhận thêm một chỗ xoắn. Nếu ta lại đổi chỗ một lần nữa, Chỗ xoắn sẽ biến mất. Tóm lại, hai khoá dây nịt nối với nhau sẽ trở lại trạng thái ban đầu của chúng chỉ sau một hoán đổi kép và sẽ không trở lại như lúc đầu nếu chỉ hoán đổi một lần.

Nói cách khác, nếu ta coi mỗi cái khoá biểu diễn cho một hạt và một chỗ xoắn biểu diễn cho thừa số -1 thì dây nịt mô tả chính xác sự biến đổi phase của hàm sóng có spin 1/2, dưới tác động của *phép quay* lẫn *sự hoán đổi*. Đặc biệt, ta thấy rằng sự biến đổi do phép quay và sự hoán đổi có liên hệ với nhau.

Tương tự như vậy, thủ thuật dây nịt cũng có thể mở rộng cho sự hoán đổi. Lấy hai khoá được nối với nhau bằng *nhiều* băng giấy hay sợi chỉ giống như trong Hình 67 hay trong Hình 68. Các băng giấy có thể nối với hạt, đi ra vô cực hay cả hai. Sự hoán đổi của



HÌNH 67 Các mô hình dây nịt mở rộng của hai hạt có spin 1/2.



HÌNH 68 Giả sử ta không thấy các dây nịt mà chỉ thấy các hình vuông biểu diễn các hạt. Ta đã biết những cái khoá hành xử giống các hạt có spin 1/2. Phim hoạt hình cho ta thấy rằng hai hạt như vậy trở lại trạng thái ban đầu nếu chúng đổi vị trí 2 lần (chứ một thì không thể). Những hạt như vậy thoả mãn các tính chất của fermion. (Trong trường hợp ngược lại, là các boson, một sự hoán đổi đơn giản sẽ trả lại trạng thái ban đầu.) Bạn có thể lặp lại thủ thuật ở nhà bằng cách dùng các băng giấy. Ở đây sự tương đương được chứng minh với hai dây đai cho mỗi hạt nhưng thủ thuật vẫn thực hiện được khi ta nối mỗi khoá với một số (dương) dây bất kỳ. Phim này chủ yếu dùng để chứng minh hạt có spin 1/2 là fermion. Điều này được gọi là định lý thống kê spin. (QuickTime film © Antonio Martos)

hai khoá tạo ra một sự liên đới khá rắc rối. Nhưng điều không thể tin được, là trong mọi trường hợp, sự hoán đổi thứ hai đều trả lại tình trạng ban đầu nếu các dây được sắp xếp lại cho đúng. Bạn có thể tự kiểm tra điều này vẫn còn đúng nếu các hạt được thêm vào miễn là bạn luôn luôn hoán đổi các cặp hạt 2 lần.

Câu đố 91 e

Ta có thể kết luận các vật bị ràng buộc hành xử giống như fermion khi hoán đổi. Kết hợp những điều này ta được định lý thống kê spin cho các hạt có spin 1/2: *spin và hành vi hoán đổi có liên hệ với nhau*. Thật vậy, những lý luận gần như 'thực nghiệm' này có thể chuyển thành ngôn ngữ toán học chính xác bằng cách nghiên cứu tính chất của không gian cấu hình của các hạt. Kết quả ta được các mệnh đề sau:

Xem 88

▷ Các vật có spin 1/2 là các fermion.*

▷ Sự hoán đổi và phép quay của các hạt có spin 1/2 là các quá trình giống nhau.

Tóm lại, các vật hành xử giống như các hạt có spin 1/2 khi quay thì cũng hành xử giống như các fermion khi hoán đổi và ngược lại. Hành vi của các hạt khi hoán đổi xác định tính chất thống kê của chúng; hành vi của hạt khi quay xác định spin của chúng. Bằng cách mở rộng thủ thuật dây nịt cho nhiều khoá, mỗi khoá có nhiều dây đai, ta sẽ hình dung được định lý thống kê spin đối với fermion.

Nên nhớ rằng tất cả các lập luận này cần không gian ba chiều vì không thể có sự liên đới (hay gút) trong không gian có ít hay nhiều chiều hơn. ** Và thật vậy, spin chỉ hiện hữu trong không gian 3 chiều.

Thủ thuật dây nịt kéo theo nhiều câu đố thú vị. Ta đã thấy vật spin 1/2 có thể được mô hình hoá bằng cách tưởng tượng ra một dây đai có một đầu ở vô cực nối với nó. Nếu ta muốn mô hình hoá hành trạng của spin bằng *dây* thay vì *băng giấy* thì ta cần tối thiểu bao nhiêu sợi? Câu đố khó hơn: thủ thuật dây nịt có thể thực hiện được không nếu ta dán cái khoá vào một tấm nệm, có tác dụng như 'vô số' dây đai?

Câu đố 93 s
Câu đố 94 d

Thiên thần, nguyên lý loại trừ của Pauli và độ cứng của vật chất

Tại sao ta có thể gõ cửa? Tại sao viên đá không thể bay xuyên qua thân cây? Khi ta bước lên núi thì nó mang chúng ta như thế nào? Tại sao ta không thể đi xuyên qua tường? Trong vật lý cổ điển, ta đã né tránh vấn đề này bằng cách xem độ cứng là một tính chất xác định của vật chất. Nhưng ta không thể làm như vậy nữa: ta đã thấy rằng vật chất chủ yếu bao gồm các đám mây electron có mật độ thấp. Lượng tử tác dụng buộc ta phải *giải thích* tính lượng tử của vật chất.

Việc giải thích tính bất khả xuyên thấu của vật chất quan trọng đến nỗi nó dẫn tới giải Nobel vật lý. *Nguyên lý loại trừ Pauli* giữa các electron trong nguyên tử không cho phép các vật thể xuyên vào nhau. Nguyên lý đó phát biểu:

▷ Hai fermion không thể chiếm cùng một trạng thái lượng tử.

Mọi thí nghiệm đều khẳng định điều này.

* Một biến động lực toán học hành xử giống như một hạt có spin 1/2 không phải là một vector lẫn tensor và bạn có thể tự kiểm tra điều này. Cần bổ sung thêm một khái niệm; biến động lực có tính chất như vậy được gọi là *spinor*. Sau này ta sẽ giới thiệu nó chi tiết hơn.

Câu đố 92 e
Trang 190

** Dĩ nhiên có gút và sự liên đới với số chiều cao hơn. Thay vì xem xét các đường một chiều bị cột lại, người ta có thể nghiên cứu các mặt phẳng hay các siêu diện nhiều chiều bị gút lại. Thí dụ như các mặt phẳng biến dạng được có thể gút lại thành 4 chiều và không gian 3 chiều có thể gút lại thành 5 chiều. Tuy vậy, số chiều hiệu dụng tạo ra gút luôn luôn là 3.

Tại sao electron và các fermion khác tuân theo nguyên lý loại trừ Pauli? Có thể trả lời điều này bằng một lập luận đơn giản và đẹp đẽ. Ta đã biết rằng sự hoán đổi 2 fermion tạo ra một dấu (-) trong hàm sóng toàn phần. Hãy tưởng tượng 2 fermion này, như một vật lý gia cổ điển đã nói, ở cùng một vị trí, hay như một vật lý gia lượng tử nói, có cùng trạng thái. Nếu điều đó xảy ra, phép hoán đổi sẽ không thay đổi điều gì trong hệ thống. Nhưng sự hoán đổi fermion phải tạo ra một dấu (-) cho trạng thái toàn phần. Cả hai khả năng, không thay đổi chút nào và thêm dấu (-), không thể hiện diện cùng lúc. Chỉ có một giải pháp: 2 fermion phải không ở trong cùng một trạng thái. Đây là nguyên lý loại trừ Pauli.

Xem 89

Nguyên lý loại trừ cũng là lý do hai mảnh vật chất thông thường chẳng những không thể xuyên vào nhau mà còn phải *đẩy* nhau ra. Thí dụ ta lấy một cái chuông. Một cái chuông không hoạt động nếu các vật va chạm để tạo ra âm thanh có thể xuyên vào nhau. Nhưng nếu hai vật xuyên vào nhau, electron của các nguyên tử khác nhau sẽ ở cùng một vị trí: chúng có cùng trạng thái. Điều này không thể xảy ra. Nguyên lý loại trừ Pauli cấm vật chất xuyên vào nhau. Chuông chỉ hoạt động được nhờ nguyên lý loại trừ.

Tại sao ta không rơi xuyên qua sàn nhà, dù có trọng lực kéo xuống, mà vẫn còn đứng trên mặt đất? Một lần nữa lại là nguyên lý loại trừ Pauli. Tại sao sàn nhà không rơi xuống? Nó không rơi vì vật chất của Trái đất không thể xuyên vào nhau và các nguyên tử không thể đến gần nhau hơn một khoảng cách nhỏ nhất nào đó. Nói cách khác, nguyên lý loại trừ Pauli hàm ý rằng vật chất của nguyên tử không thể bị nén đến mức vô hạn. Đến một giai đoạn nào đó một *áp suất Pauli* hiệu dụng xuất hiện, một giới hạn nén được đạt đến. Vì lý do này, các hành tinh gồm các nguyên tử vật chất – hay các sao neutron, có spin 1/2 và tuân theo nguyên lý loại trừ – không thể suy sụp dưới tác dụng của lực hấp dẫn.

Nguyên lý loại trừ giải thích cho việc nguyên tử là các đám mây electron *linh hoạt* và nguyên tử khác nhau có kích thước khác nhau. Đúng ra nguyên lý loại trừ buộc các electron trong nguyên tử phải tạo thành *các lớp vỏ*. Khi electron được thêm vào quanh hạt nhân và khi một lớp vỏ được lấp đầy một lớp vỏ mới được tạo ra. Đây là nguồn gốc của hệ tuần hoàn của các nguyên tố.

Kích thước của một nguyên tử bất kỳ là kích thước của lớp vỏ ngoài cùng. Không có nguyên lý loại trừ, các nguyên tử sẽ nhỏ như một nguyên tử hydrogen. Đúng ra phần lớn các nguyên tử đã lớn hơn khá nhiều. Lập luận tương tự cũng áp dụng được cho hạt nhân: kích thước của chúng là kích thước của vỏ hạt nhân ngoài cùng. Không có nguyên lý loại trừ, hạt nhân sẽ nhỏ như một proton. Thật ra chúng thường lớn hơn khoảng 100 000 lần.

Nguyên lý loại trừ cũng trả lời cho một câu hỏi cũ: có bao nhiêu *thiên thần* có thể khiêu vũ trên đầu một cây kim? (Cũng nên nhớ rằng đầu của một cây kim là một điểm trong không gian và thiên thần chắc cũng được cấu tạo từ các fermion, điều mà chắc bạn cũng nghĩ như vậy để có thể suy diễn từ các thông tin đã biết về họ.) Cả lý thuyết lẫn thực nghiệm đều khẳng định câu trả lời mà Thomas Aquinas thời Trung cổ đã đưa ra: Chỉ có *một* thiên thần! Nguyên lý loại trừ fermion cũng có thể được gọi là 'nguyên lý loại trừ thiên thần'. Nguyên lý này cũng chứng tỏ rằng *ma quỷ* không thể là các vật thể vì người ta cho rằng chúng có thể đi xuyên qua tường.

Câu đố 95 s

Xem 90

Ta hãy tổng kết lại. Nói đơn giản một chút, nguyên lý loại trừ giải thích sự không đổi về hình dạng của các vật. Không có nguyên lý này, sẽ không có vật thể 3 chiều. Nguyên lý loại trừ ấn định đường kính của các đám mây nguyên tử, không cho các đám mây hợp nhất và tách chúng ra xa nhau. Lực đẩy này giải thích cho kích thước của xà bông, các hành tinh và sao neutron. Mọi hình dạng của chất rắn và lỏng là hệ quả trực tiếp của



nguyên lý loại trừ. Nói cách khác, khi ta gõ lên bàn hay cửa, ta đã chứng minh bằng thực nghiệm là các vật này và tay ta là các fermion.

Cho đến bây giờ ta chỉ mới xem xét fermion có spin 1/2. Ta sẽ không nói nhiều về các hạt có spin lẻ và lớn hơn như 3/2 hay 5/2. Những hạt như vậy có thể được xem như được cấu tạo từ các thực thể có spin 1/2. Bạn có thể chứng minh điều đó không?

Câu đố 96 e

Ta cũng không nói về spin nhỏ hơn 1/2. Có một định lý nói rằng không thể có spin trong khoảng 0 và 1/2 trong không gian 3 chiều. Không thể có spin nhỏ hơn vì góc quay lớn nhất trong không gian 3 chiều là 4π. Không thể đo góc lớn hơn; lượng tử tác dụng cũng cấm điều này. Như vậy không thể có spin trong khoảng 0 và 1/2 trong thiên nhiên.

Xem 82

Spin có phải là chuyển động quay quanh một trục không?

Về mặt thực nghiệm Spin của một hạt giống như moment động lượng riêng, cộng lại như moment động lượng, bảo toàn như một phần của moment động lượng, được mô tả như moment động lượng và có tên đồng nghĩa với moment động lượng. Dù vậy, trong nhiều thập kỷ, một huyền thoại kỳ dị và sai lầm đã lan truyền trong nhiều cuốn sách vật lý và sách giáo khoa trên khắp thế giới: "Dù mang tên như vậy, Spin 1/2 *không có nghĩa là* chuyển động quay quanh một trục." Đã đến lúc kết thúc tư tưởng sai lầm này.

Electron có spin 1/2 và điện tích. Electron và mọi hạt mang điện với spin 1/2 đều có moment từ.* Điện tích quay nào cũng có moment từ. Nói cách khác, spin 1/2 cũng có tác động giống như một chuyển động quay. Tuy vậy, việc giả sử một hạt có phân bố điện tích *liên tục* tham gia vào chuyển động quay lại cho một giá trị moment từ không đúng. Trong những ngày đầu thế kỷ 20, khi vật lý gia còn suy nghĩ theo lối cổ điển, họ phải kết luận rằng điện tích có spin 1/2 không quay. Huyền thoại này đã tồn tại trong nhiều sách giáo khoa. Do đó muốn suy diễn đúng thì 'giả sử phân bố điện tích liên tục' phải sai. Thật vậy, điện tích bị lượng tử hoá; không ai mong chờ điện tích sơ cấp trải rộng trong không gian một cách liên tục vì điều đó mâu thuẫn với tính lượng tử của chúng.

Một lý do nữa giải thích cho sự sai lầm của huyền thoại chính là chuyển động quay. Huyền thoại dựa trên tư duy cổ điển và cứ cho rằng vật quay nào cũng phải có spin *nguyên*. Vì trong vật lý cổ điển không thể có spin bán nguyên nên người ta cho rằng spin đó không do chuyển động quay. Nhưng ta hãy nhắc lại định nghĩa chuyển động quay. Cả thủ thuật dây nịt đối với spin 1/2 lẫn spin nguyên đều nhắc chúng ta: *chuyển động quay* của một vật quanh một vật khác là một phần hay nhiều phần của một sự hoán đổi. Vật quay trong đời sống hằng ngày là một vật mà vị trí các phần của nó hoán đổi liên tục – và ngược lại.

▷ Chuyển động quay và sự hoán đổi là hai quá trình giống nhau.

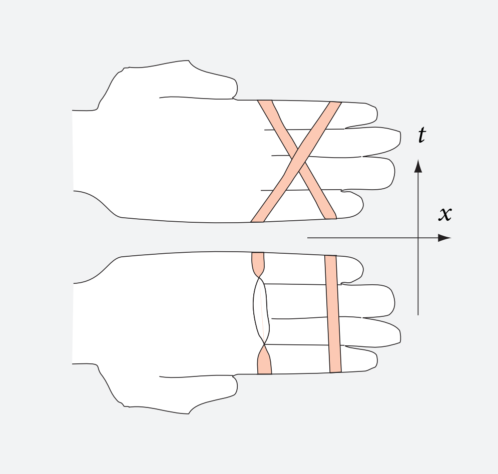
Nhưng ta nhận thấy rằng spin đúng là một hành vi hoán đổi. Vì chuyển động quay và spin đều là sự hoán đổi nên ta kết luận

▷ Spin *là* chuyển động quay.

Vì chúng ta giống như Wigner, đã suy ra spin từ sự bất biến của phép quay nên kết luận

* Moment từ này rất dễ đo bằng thí nghiệm; tuy vậy nó không giống kiểu thí nghiệm của Stern–Gerlach. Tại sao như vậy?

Câu đố 97 ny



HÌNH 69 Sự tương đương của phép hoán đổi và phép quay trong không–thời gian.

này không có gì lạ. Ngoài ra, mô hình dây đai của một hạt spin 1/2 cho ta biết rằng một hạt như vậy có thể quay liên tục mà không bị cản trở gì. Và như vậy moment từ sẽ có giá trị đúng. Tóm lại, ta được quyền xem spin là chuyển động quay quanh một trục mà không gặp mâu thuẫn gì với thực tế ngay cả trường hợp spin 1/2.

Trang 132

Tóm lại, mô hình dây đai chứng tỏ rằng spin 1/2 là chuyển động quay, miễn là ta giả sử rằng chỉ có khoá là được nhìn thấy còn các sợi dây thì không và điện tích sơ cấp không phân bố liên tục trong không gian.*

Xem 91

Vì mô hình dây đai mô tả quá tốt tính chất hoán vị và spin của fermion, ta có thể kết luận rằng các tính chất này thực sự là hệ quả của mối liên hệ kiểu dây đai giữa hạt và thế giới bên ngoài. Có lẽ vì một số lý do nào đó nên ta chỉ thấy khoá mà không thấy dây. Trong phần cuối của cuộc đi dạo này ta sẽ sẽ biết ý tưởng này đúng hay sai.

Chuyển động quay cần các phản hạt

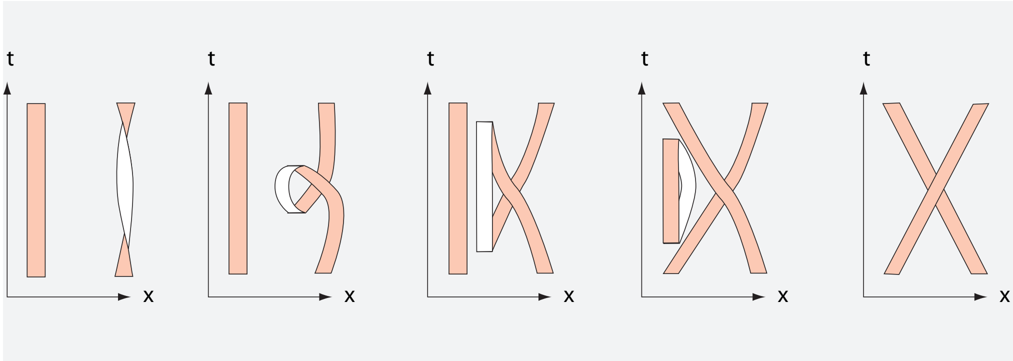
Mối liên hệ giữa chuyển động quay và các phản hạt có lẽ là kết luận đáng ngạc nhiên nhất rút ra từ các thí nghiệm chứng minh sự hiện hữu của spin. Cho tới lúc này, ta đã thấy rằng chuyển động quay cần có spin, spin xuất hiện khi Thuyết tương đối được đưa vào Thuyết lượng tử và Thuyết tương đối cần có phản vật chất. Kết hợp ba mệnh đề này, tiêu đề không còn làm ta ngạc nhiên: chuyển động quay cần các phản hạt. Điều thú vị là có một lập luận đơn giản cho cùng kết quả như mô hình dây đai nếu nó được mở rộng từ không gian đơn thuần sang *không-thời gian*.

Quyển II, trang 74

Để học cách suy nghĩ trong không-thời gian, ta hãy lấy một hạt và thu gọn nó thành một đoạn thẳng ngắn. Khi chuyển động trong không–thời gian 2+1 chiều, hạt được mô tả bằng một ruy băng. Vui đùa với dải ruy băng trong không-thời gian, thay vì dây nịt trong không gian, sẽ cho ta nhiều kết luận thú vị. Thí dụ, Hình 69 chứng tỏ rằng việc quấn một dây thun quanh các ngón tay, một lần nữa, có thể chứng tỏ rằng một vật quay

Câu đố 98 ny

* Điều hiển nhiên là vào lúc này, cấu trúc chính xác của electron vẫn *chưa rõ ràng*. Moment động lượng S vẫn theo công thức cổ điển $S = \Theta\omega$; tuy vậy, cả moment quán tính Θ, liên hệ với bán kính quay và khối lượng electron, lẫn vận tốc góc ω đều không biết. Ta phải chờ khá lâu, cho tới phần cuối của cuộc thám hiểm mới được biết rõ hơn.



HÌNH 70 Các ruy băng trong không-thời gian: phép quay và các phản hạt.

một góc 2π khi có mặt vật thứ hai cũng giống như việc hoán đổi vị trí của 2 vật.* Hai mặt của bàn tay biến đổi từ trạng thái ban đầu tới trạng thái sau cùng, từ cạnh này tới cạnh kia của bàn tay. Như vậy ta đã mở rộng thành công một kết quả đã biết từ không gian sang không-thời gian: phép quay và phép hoán đổi là tương đương.

Nếu bạn nghĩ rằng Hình 69 chưa giải thích rõ, bạn đã đúng. Việc giải thích rõ ràng hơn phải bao gồm một chuỗi các bước uyển chuyển hơn để thể hiện sự tương đương giữa phép quay và phép hoán đổi. Điều này được trình bày trong Hình 70. Ta giả sử rằng mỗi hạt được mô tả bằng một đoạn thẳng; trong hình, hai đoạn thẳng nằm ngang. Sơ đồ ngoài cùng bên trái cho thấy 2 hạt: một đứng yên và một quay đi một góc 2π. Sự biến dạng của ruy băng chứng tỏ rằng quá trình này tương đương với sự hoán đổi vị trí của 2 hạt, biểu diễn trong hình ngoài cùng bên phải.

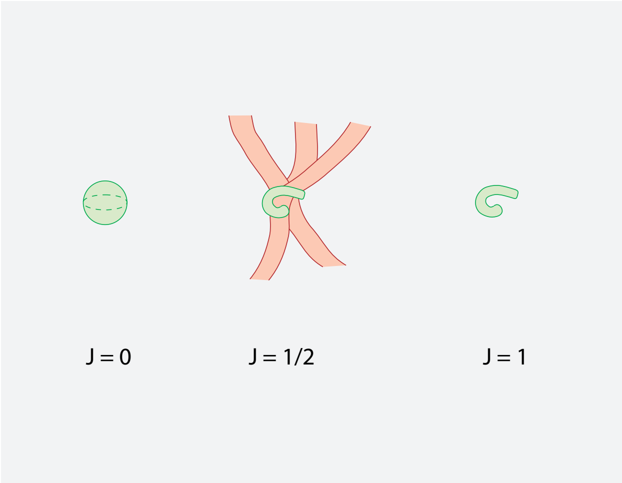
Nhưng điểm quan trọng được thể hiện bởi các hình trung gian. Ta cần chú ý rằng dãy hình trình diễn sự tương đương giữa phép quay và phép hoán đổi cần sử dụng một vòng kín. Nhưng một cái vòng như vậy trong không-thời gian lại mô tả sự xuất hiện của một cặp hạt-phản hạt! Nói cách khác, không có phản hạt, không còn sự tương đương giữa phép quay và phép hoán đổi. Tóm lại, phép quay trong không-thời gian cần sự hiện hữu của các phản hạt.

TẠI SAO KHÔNG THỂ ĐẤU KIẾM BẰNG CÁC CHÙM TIA LASER?

Khi một thanh gươm tới gần một cách nguy hiểm, ta có thể chặn nó bằng một thanh gươm thứ hai. Nhiều film cũ đã có những cảnh như vậy. Khi một chùm laser tới gần, không thể chặn nó bằng một chùm tia thứ hai, dù tất cả các film khoa học giả tưởng đều 'diễn' như vậy. Không thể đánh nhau bằng hai chùm laser. Việc giải thích về định lý thống kê spin đã cho thấy lý do.

Electron trong kiếm là fermion và tuân theo nguyên lý loại trừ Pauli. Fermion làm cho vật chất không thể xuyên qua nhau được. Photon trong chùm laser là boson. Hai boson *có thể* có cùng một trạng thái; boson cho phép xuyên vào nhau. Vật chất không thể xuyên vào nhau vì ở mức cơ bản *nó được tạo thành từ các fermion*. Bức xạ bao gồm các boson; chùm ánh sáng có thể xuyên qua nhau. Sự phân biệt giữa fermion và boson

* Dĩ nhiên ta cần bàn luận rốt ráo để kiểm tra đầy đủ mô hình spin 1/2 của Hình 65 trong không-thời gian 4 chiều. Nhưng làm việc này không phải là điều dễ dàng; chưa có cách biểu diễn điều này cho dễ hình dung.



HÌNH 71 Một số hình ảnh của các biểu diễn của spin.

sẽ giải thích lý do các vật có thể chạm nhau trong khi hình ảnh thì không. Trong phần đầu tiên của cuộc hành trình ta đã ghi nhận sự khác biệt này; bây giờ ta đã rõ nguyên do.

Quyển I, trang 99

Spin, thống kê học và hợp thể

Khi quay, các hạt có spin nguyên hành xử khác với các hạt có spin bán nguyên. Các hạt có spin nguyên không đổi dấu một cách kỳ lạ khi quay một góc 2π. Trong mô hình dây đai, các hạt có spin nguyên không cần cột dây. Đặc biệt, hạt có spin 0 hiển nhiên là tương đương với một hình cầu. Mô hình cho các giá trị spin quan trọng khác được cho trong Hình 71. Tìm hiểu các tính chất của chúng theo cách tương tự như trên ta đi đến *định lý thống kê spin* đầy đủ:

▷ Phép hoán đổi và phép quay là các quá trình giống nhau.

▷ Các vật có spin bán nguyên là các fermion. Chúng tuân theo nguyên lý loại trừ Pauli.

▷ Các vật có spin nguyên là các boson.

Câu đố 99 e

Bạn có thể chứng minh rằng bao nhiêu đó đủ để chứng minh quy luật sau đây:

▷ Hợp thể của các boson cũng như hợp thể của một số nguyên chẵn fermion (có năng lượng thấp) là boson; hợp thể của một số nguyên lẻ fermion là fermion.*

Những mối liên hệ này biểu thị các đặc trưng cơ bản của thế giới 3 chiều mà ta đang

* Quy luật này hàm ý rằng spin 1 và lớn hơn cũng có thể biểu diễn *bằng* các đoạn thẳng; bạn có thể tìm thấy một biểu diễn như vậy không?

Câu đố 100 s

Nên nhớ rằng fermion phức hợp chỉ có thể là boson ở mức năng lượng mà cấu tạo bị phá vỡ. Nếu không thì bằng cách ghép fermion thành boson ta có thể có các fermion trong cùng một trạng thái.

sống. Banh tennis, con người, cây cối, núi đồi và tất cả các vật vĩ mô khác thuộc về lớp hạt nào?

Câu đố 101 s

Kích thước và mật độ vật chất

Ba chiều không gian có nhiều hệ quả đối với các hệ vật lý. Ta đã biết rằng mọi vật chất đều được tạo thành từ fermion, như electron, proton và neutron. Nguyên lý loại trừ có một hệ quả thú vị đối với các hệ gồm N fermion *giống nhau*; những hệ như vậy tuân theo biểu thức của động lượng p và kích thước l như sau:

$$\Delta p\, \Delta l \gtrsim N^{1/3}\hbar\ . \qquad (67)$$

Câu đố 102 e

Bạn có thể chứng minh công thức này không? *Hệ thức bất định mở rộng* này cho ta một cách đơn giản để ước lượng kích thước trong không gian của các hệ vật chất. Đặc biệt, hệ thức bất định mở rộng dẫn tới việc năng lượng trung bình cho mỗi quanton tăng theo mật độ quanton. Bạn có thể chứng minh điều này không?

Xem 92

Câu đố 103 e

Hệ thức bất định mở rộng hàm ý rằng các hệ vật chất mà sự linh hoạt của chúng bắt nguồn từ electron – cũng như mọi hệ vật chất ngưng tụ – về bản chất có mật độ năng lượng và vật chất giống nhau. Hệ thức bất định mở rộng cũng hàm ý rằng hạt nhân, được tạo thành từ proton và neutron, về bản chất đều có mật độ vật chất giống nhau.

Đối với boson, các thành phần của bức xạ, không có hệ thức bất định mở rộng, vì số thành phần N trong một trạng thái lượng tử đặc biệt không có một tác dụng hay giới hạn nào. Như vậy hệ thức bất định không giới hạn mật độ năng lượng của laser; và thật vậy, mật độ năng lượng của chùm laser thay đổi nhiều hơn mật độ chất rắn.

Hệ thức bất định còn làm nổi bật sự khác biệt sâu xa giữa vật chất và bức xạ. Như ta đã thấy trước kia, một hệ gồm N boson giống nhau, như một chùm laser, tuân theo hệ thức bất định giữa số lượng và phase mà ta có thể dễ dàng suy ra từ hệ thức bất định năng lượng–thời gian. Hệ thức số lượng–phase có thể viết một cách gần đúng như sau

Trang 49

$$\Delta N\, \Delta\varphi \gtrsim 1\ . \qquad (68)$$

Việc sử dụng laser trong các thí nghiệm chính xác là điều quan trọng. Hệ thức này giới hạn mức độ mà hệ có thể tiệm cận với một sóng hình sine thuần tuý; đối với một sóng hình sine thuần tuý, tích trên sẽ bằng 0.

Đối với fermion, số hạt nhiều nhất có cùng trạng thái là 1, hệ thức bất định số lượng–phase thu gọn thành một độ bất định toàn phần của phase. Nói cách khác, ta lại thấy rằng không thể có chùm fermion hành xử như sóng. Không có sóng fermion theo kiểu cổ điển và cũng không có chùm fermion điều hợp trong thiên nhiên.

Trang 101

Tóm tắt về spin và tính không phân biệt được

Lượng tử tác dụng $\hbar$ dẫn tới việc các hệ vật lý được tạo thành từ hai loại hạt lượng tử không phân biệt được: *boson* và *fermion*. Hai tính chất khả hữu của phép hoán đổi có liên hệ với giá trị spin của hạt, vì phép hoán đổi có liên hệ với phép quay. Sự nối kết giữa spin và phép quay hàm ý sự hiện hữu của các phản hạt. Nó cũng kéo theo việc spin thực chất là một hiện tượng 3 chiều.

Thí nghiệm chứng tỏ rằng bức xạ được tạo thành từ các hạt có hành vi giống các boson. Boson có spin nguyên. Hai hay nhiều boson, thí dụ như 2 photon, *có thể chia sẻ* chung một trạng thái. Việc chia sẻ này khiến người ta tạo ra được laser.

Thí nghiệm chứng tỏ rằng vật chất được tạo thành từ các hạt có hành vi giống các fermion. Fermion có spin bán nguyên. Chúng tuân theo nguyên lý loại trừ Pauli: 2 fermion *không thể có* chung trạng thái. Nguyên lý loại trừ giữa các electron giải thích cho cấu trúc và (phần nào) kích thước của các nguyên tử cũng như hoá tính của chúng như ta sẽ thấy sau này. Cùng với lực đẩy tĩnh điện của electron, nguyên lý loại trừ giải thích được tính không nén được và tính bất khả xuyên thấu của vật chất.

Fermion làm cho vật chất 'cứng', boson cho phép các chùm ánh sáng cắt nhau.

Các giới hạn và các câu hỏi mở về thống kê lượng tử

Chủ đề thống kê các hạt lượng tử vẫn còn là lĩnh vực nghiên cứu trong vật lý lý thuyết và thực nghiệm. Đặc biệt, các nhà nghiên cứu đã tìm kiếm và vẫn còn tìm kiếm cho việc tổng quát hoá các tính chất khả hữu của phép hoán đổi các hạt.

Trong không gian 2 chiều, tác dụng của một phép hoán đổi hạt lên hàm sóng là một phase liên tục, khác với không gian 3 chiều, có kết quả là một sự đổi dấu. Do đó vật lượng tử 2 chiều được gọi là *anyon* vì chúng có thể có spin 'bất kỳ (any)'. Anyon xuất hiện như các giả hạt trong các thí nghiệm khác nhau trong vật lý thể rắn vì các thí nghiệm thường có kết quả 2 chiều. *Hiệu ứng Hall lượng tử phân số* có lẽ là khám phá thú vị nhất của vật lý thực nghiệm hiện đại, đã đẩy anyon lên sân khấu nghiên cứu hiện đại.

Trang 138

Các lý thuyết gia khác đã tổng quát hoá khái niệm fermion theo những cách khác, đã đưa ra parafermion, paraboson, plekton và các khái niệm mang tính giả thuyết khác. Oscar Greenberg đã dành phần lớn sự nghiệp của ông cho đề tài này. Kết luận của ông là:

Quyển V, trang 105
Xem 93

▷ Trong không-thời gian 3 + 1 chiều chỉ có fermion và boson.

Bạn có thể chứng tỏ rằng kết quả này hàm ý không thể có ma quỷ xuất hiện trong truyện của Scotland không?

Câu đố 104 s

Từ một quan điểm khác, mô hình dây đai của spin 1/2 mở rộng cửa cho việc nghiên cứu tính chất của dải bện, liên kết mở và gút. (Trong toán học, dải bện và liên kết mở được tạo thành từ các dây dài đến vô cực.) Lĩnh vực vật lý toán hấp dẫn này đã trở nên quan trọng trong Lý thuyết thống nhất hiện đại, là lý thuyết đã cho rằng hạt, đặc biệt khi có năng lượng lớn, không phải là chất điểm mà là các thực thể linh hoạt. Sứ mệnh của chúng ta là tìm hiểu những điều đang xảy ra cho phép đối xứng hoán vị trong lý thuyết thống nhất của thiên nhiên. Một vài khó khăn đã xuất hiện ở trên: làm cách nào để có thể kết hợp các hình 60, 65 và 70 và hoà nhập chúng? Ta sẽ giải quyết vấn đề này trong phần sau cùng của cuộc hành trình lên đỉnh.

Quyển VI, trang 174

Chương 7

Sự chồng chập và xác suất – Thuyết lượng tử không ý thức hệ

Xem 94

> Việc trình bày đầy đủ theo triết học đã bị trì hoãn quá lâu, rõ ràng là do Niels Bohr đã gieo vào đầu nguyên cả một thế hệ lý thuyết gia ý nghĩ rằng công việc đã hoàn thành cách nay 50 năm.
>
> Murray Gell-Mann

Tại sao vấn đề vật lý nổi tiếng này lại gây ra nhiều cảm xúc mạnh mẽ như vậy? Đặc biệt, người bị tẩy não là Gell-Mann đã khám phá ra quark hay phần lớn các vật lý gia của thế giới đang nghiên cứu về Thuyết lượng tử lại đi theo tư tưởng của Niels Bohr? Trong thế kỷ 20, cơ học lượng tử đã rơi vào sự hỗn độn này. Ta có một mục tiêu đơn giản: muốn *hiểu* về Thuyết lượng tử. Cơ học lượng tử có vẻ xa lạ vì 2 lý do: nó cho phép *sự chồng chập* và dẫn tới *xác suất*. Trong chương này ta sẽ tìm hiểu và làm sáng tỏ 2 chủ đề – cho tới lúc ta hiểu được Thuyết lượng tử.

Xác suất xuất hiện khi ta đo một đặc trưng nào đó của hệ vi mô. Lượng tử tác dụng, độ biến đổi nhỏ nhất trong thiên nhiên, dẫn tới sự xuất hiện của xác suất trong phép đo.

Sự chồng chập xuất hiện vì lượng tử tác dụng thay đổi tận gốc rễ hai khái niệm cơ bản nhất của vật lý cổ điển: trạng thái và hệ thống. *Trạng thái* không còn được xác định và mô tả bằng các trị riêng của vị trí và động lượng mà bằng hàm sóng riêng của các toán tử vị trí và động lượng.** Ngoài ra, trong vật lý cổ điển một *hệ* được mô tả và xác định như một tập hợp các thể hiện bình thường của thiên nhiên; bình thường có nghĩa là tương tác với môi trường có thể bỏ qua. Cơ học lượng tử cho ta thấy rằng các định nghĩa này phải được sửa đổi.

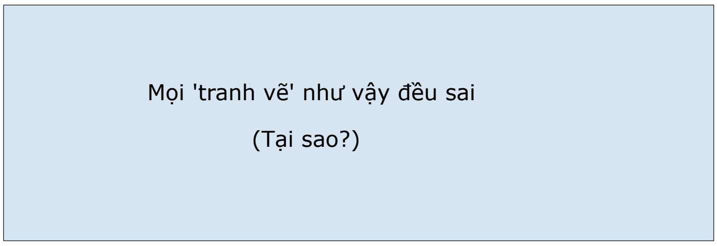
Việc làm sáng tỏ nguồn gốc của sự chồng chập và xác suất cũng như các khái niệm về hệ và trạng thái sẽ giúp ta không bị lạc đường khi lên đỉnh Hành Sơn. Thật vậy, khá nhiều nhà nghiên cứu đã lạc đường từ khi Thuyết lượng tử xuất hiện, bao gồm các vật lý gia nổi tiếng như Murray Gell-Mann và Steven Weinberg.

Tại sao con người chỉ có sinh hoặc tử?

Phương trình tiến hoá của Thuyết lượng tử thì có hàm sóng *tuyến tính*; sự tuyến tính phản ánh sự chồng chập. Sự chồng chập hàm ý rằng ta có thể tưởng tượng và xây dựng

** Nếu ta nói rằng trạng thái được mô tả bằng một tập hợp đầy đủ các toán tử giao hoán thì cũng tương đương nhưng về mặt khái niệm thì rõ ràng hơn. Đúng ra việc bàn luận về các trạng thái theo cách nhìn của Heisenberg thì ít nhiều gì cũng đơn giản hơn. Tuy vậy ở đây ta chỉ nghiên cứu vấn đề này theo cách nhìn của Schrödinger, tức là sử dụng các hàm sóng.

Câu đố 105 s



HÌNH 72 Tranh vẽ của một hoạ sĩ về ý tưởng không thể có sự chồng chập vĩ mô – vì ta không tìm thấy chúng trong môi trường của chúng ta.

các hệ trong đó trạng thái ψ là một chồng chập của 2 trạng thái khác biệt hoàn toàn, như tình trạng chết và sống của một con mèo. Con vật giả tưởng nổi tiếng này được gọi là *con mèo của Schrödinger*, lấy theo tên của người đưa ra thí dụ. Có thể tạo ra tình trạng đó hay không? Và nó sẽ tiến hoá như thế nào theo thời gian? Ta có thể hỏi hai câu tương tự trong các tình huống khác. Thí dụ, ta có thể tạo ra sự chồng chập giữa 2 trạng thái, xe đậu trong garage đóng cửa và xe đậu bên ngoài không? Lúc đó thì điều gì sẽ xảy ra?

Sự chồng chập vĩ mô thì kỳ lạ hơn. Ta không thấy những trường hợp như vậy trong đời sống hằng ngày và rất hiếm thấy trong phòng thí nghiệm. Lý do nằm ở tính chất quan trọng của 'việc diễn giải' cơ học lượng tử. Thật ra những tình huống kỳ lạ đó có thể *xảy ra* và sự chồng chập của các trạng thái khác biệt vĩ mô đã được quan sát thấy trong vài trường hợp mặc dù không phải là mèo, người hay xe. Để có khái niệm về các hạn chế này, ta hãy xem xét chi tiết hơn.*

Sự chồng chập vĩ mô, điều hợp và mất điều hợp

Đối tượng của việc bàn luận ở đây là sự chồng chập tuyến tính theo kiểu $\psi = a\psi_a + b\psi_b$, trong đó ψ_a và ψ_b là các trạng thái vĩ mô khác biệt của hệ đang được đề cập, a và b là các hệ số phức. Các trạng thái được gọi là *khác biệt vĩ mô* khi mỗi trạng thái tương ứng với các tình trạng vĩ mô khác nhau, tức là khi 2 trạng thái có thể phân biệt được bằng cách sử dụng các khái niệm hay các phương pháp đo của vật lý cổ điển. Đặc biệt, điều này có nghĩa là tác dụng vật lý cần để biến đổi trạng thái này thành trạng thái khác phải lớn hơn $\hbar$ rất nhiều. Thí dụ như hai vị trí khác nhau của vật bao gồm một số lớn các nguyên tử thì được xem là khác biệt vĩ mô. Trạng thái của một con mèo đang sống và của một con mèo đã chết cũng khác nhau nhiều lượng tử tác dụng.

Như vậy một trạng thái 'kỳ dị' là sự chồng chập các trạng thái khác biệt vĩ mô. Ta hãy làm rõ bản chất của sự chồng chập vĩ mô. Cho hai trạng thái vĩ mô khác biệt ψ_a và ψ_b, sự chồng chập theo kiểu $\psi = a\psi_a + b\psi_b$ được gọi là *trạng thái thuần tuý*. Vì các trạng thái ψ_a và ψ_b có thể giao thoa với nhau, người ta cũng có thể nói về *sự chồng chập điều hợp (phase)*. Trong trường hợp chồng chập các trạng thái khác biệt vĩ mô, tích vô hướng $\psi_a^\dagger\psi_b$ hiển nhiên bằng 0. Trong trường hợp chồng chập điều hợp, tích các hệ số a^*b thì khác 0. Điều này cũng có thể phát biểu bằng *matrix mật độ* ρ của hệ theo công thức

* Phần lớn những điều liên quan đến vấn đề này đều đã được ba nhà nghiên cứu nổi tiếng nói đến: Niels Bohr, cha đẻ của Vật lý lượng tử, John von Neumann, người mà trong những năm 1930s đã nhấn mạnh đến sự khác nhau giữa sự tiến hoá và sự mất điều hợp, và Heinz Dieter Zeh, người mà trong những năm 1970s đã nhấn mạnh đến tầm quan trọng của môi trường trong quá trình mất điều hợp .

Xem 95
Xem 96

$\rho = \psi \otimes \psi^\dagger$. Trong trường hợp đang xét công thức đó là

$$\begin{aligned}\rho_{\text{pure}} = \psi \otimes \psi^\dagger &= |a|^2 \psi_a \otimes \psi_a^\dagger + |b|^2 \psi_b \otimes \psi_b^\dagger + a\, b^* \psi_a \otimes \psi_b^\dagger + a^*\, b\, \psi_b \otimes \psi_a^\dagger \\ &= (\psi_a, \psi_b) \begin{pmatrix} |a|^2 & a\, b^* \\ a^*\, b & |b|^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_a^\dagger \\ \psi_b^\dagger \end{pmatrix} . \end{aligned} \quad (69)$$

Ta có thể nói rằng khi hệ đang ở trong trạng thái thuần tuý, điều hợp thì matrix mật độ của nó hay *phiếm hàm mật độ*, chứa những số hạng ngoài đường chéo có cùng bậc độ lớn với các số hạng trên đường chéo.* Matrix mật độ này tương ứng với các trường hợp kỳ dị mà ta không thấy trong đời sống hằng ngày đã để cập ở trên.

Bây giờ ta hãy quan sát một trường hợp đối nghịch, matrix mật độ của các trạng thái vĩ mô khác biệt có các phần tử ngoài đường chéo *bằng 0*. Đối với trường hợp 2 trạng thái thí dụ như

$$\begin{aligned}\rho_{\text{mixed}} &= |a|^2 \psi_a \otimes \psi_a^\dagger + |b|^2 \psi_b \otimes \psi_b^\dagger \\ &= (\psi_a, \psi_b) \begin{pmatrix} |a|^2 & 0 \\ 0 & |b|^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_a^\dagger \\ \psi_b^\dagger \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (71)$$

mô tả một hệ *không* điều hợp phase một chút nào cả. (Ở đây, ⊗ ký hiệu tích nhị nguyên không giao hoán hay tích tensor sẽ tạo ra một tensor hay một matrix từ 2 vector.) Matrix mật độ đường chéo như vậy không thể là matrix của một trạng thái thuần tuý; matrix mật độ mô tả một hệ trong trạng thái ψ_a với xác suất $|a|^2$ và trong trạng thái ψ_b với xác suất $|b|^2$. Ta nói hệ đang ở trong một *trạng thái hoà trộn*, vì trạng thái của nó *chưa được biết*, hay một cách tương đương, đang ở trong một *trạng thái chồng chập không điều hợp (phase)*: không có giao thoa trong trường hợp như vậy. Một hệ được mô tả bằng một trạng thái hoà trộn luôn luôn *ở trong* trạng thái ψ_a *hay* trạng thái ψ_b. Nói cách khác, matrix mật độ đường chéo đối với các trạng thái vĩ mô khác biệt phù hợp với kinh nghiệm của đời sống hằng ngày.

Trong bức tranh matrix mật độ, các phần tử ngoài đường chéo chứa sự khác biệt giữa sự chồng chập bình thường, tức là không điều hợp và khác/dị thường tức là sự chồng chập điều hợp.

Đối với các trạng thái khác biệt vĩ mô, ta chỉ quan sát được matrix mật độ đường chéo trong đời sống hằng ngày. Hầu như mọi hệ, khi chồng chập vĩ mô điều hợp, vì lý do nào đó, mất các phần tử matrix ngoài đường chéo. Quá trình *mất điều hợp* này – còn được gọi là *sự không liên đới* – xảy ra như thế nào? Matrix mật độ sẽ cho ta biết điều này.

---

* Sử dụng matrix mật độ ta có thể viết lại phương trình tiến hoá của một hệ lượng tử như sau:

$$\dot{\psi} = -iH\psi \quad \text{trở thành} \quad \frac{d\rho}{dt} = -\frac{i}{\hbar}[H, \rho] . \quad (70)$$

Cả hai hoàn toàn tương đương. (Biểu thức mới đôi khi còn được gọi là *phương trình von Neumann*.) Ta không phải tính toán gì ở đây. Biểu thức được ghi ra đây để bạn có thể nhận ra chúng khi gặp lại ở nơi khác.

Sự mất điều hợp do các nguồn nhiệt động lực

Xem 97
Câu đố 106 ny

Trong Nhiệt động lực học, matrix mật độ ρ của một hệ lớn được sử dụng để xác định entropy S – và các đại lượng nhiệt động lực khác. Các nghiên cứu về vấn đề này chứng tỏ rằng

$$S = -k\,\mathrm{tr}\,(\rho \ln \rho) \tag{72}$$

trong đó tr ký hiệu *vết*, tức là tổng của các phần tử đường chéo và k là hằng số Boltzmann. Biểu thức này là định nghĩa theo cơ lượng tử của entropy.

Ở đây ta cũng nhắc lại rằng một hệ vật lý có entropy lớn và không đổi được gọi là *bể chứa nhiệt động lực*. Xét về mặt vật lý, một bể chứa nhiệt động lực là một hệ mà ta có thể gán cho nó một nhiệt độ. Nói chính xác hơn,

> Một *bể chứa (vật lý)* – còn được gọi là một *nguồn (nhiệt động lực)* – là một hệ lớn mà ta có thể áp dụng được khái niệm *cân bằng nhiệt động lực*.

Thí nghiệm chứng tỏ rằng trong thực tế, điều này tương đương với điều kiện một nguồn nhiệt động lực bao gồm nhiều hệ con tương tác với nhau. Vì lý do này, tất cả các đại lượng vĩ mô mô tả trạng thái của một nguồn nhiệt động lực cho thấy có *sự thăng giáng* nhỏ và không đều, một tính chất cực kỳ quan trọng.

Một bồn tắm quen thuộc cũng là một nguồn nhiệt động lực: thật vậy, một nguồn nhiệt động lực cũng giống như bồn nước ấm rất lớn, một hệ mà nhiệt độ của nó không thay đổi ngay cả khi ta thêm một lượng nước lạnh vào trong hệ. Khái niệm bể chứa vật lý, hay nguồn nhiệt động lực, là một sự trừu tượng hoá và tổng quát hoá khái niệm bồn tắm quen thuộc. Các thí dụ về bồn chứa nhiệt động lực khác là: một từ trường mạnh, một lượng khí lớn hay một vật rắn to. (Ý nghĩa của 'mạnh' và 'to lớn' dĩ nhiên tuỳ thuộc vào hệ đang xem xét.)

Định nghĩa (72) của entropy cho ta thấy rằng sự biến mất của các phần tử ngoài đường chéo tương ứng với sự gia tăng entropy. Thêm vào đó, sự gia tăng entropy của một hệ thuận nghịch, như hệ cơ lượng tử đang xét, bắt nguồn từ sự tương tác với một nguồn nhiệt động lực.

Câu đố 107 s

Tóm lại, *sự mất điều hợp bắt nguồn từ sự tương tác với một nguồn nhiệt động lực*. Thêm nữa, sự mất điều hợp là một quá trình gia tăng entropy: sự mất điều hợp là một quá trình không thuận nghịch. Bây giờ ta sẽ chứng tỏ rằng các nguồn nhiệt động lực có ở khắp nơi, và như vậy sự mất điều hợp xảy ra ở mọi lúc, mọi nơi, do đó (gần như) ta không bao giờ thấy sự chồng chập vĩ mô.

Cách mà nguồn nhiệt động lực làm mất điều hợp – sự tán xạ

Nguồn nhiệt động lực tương tác với một hệ điển hình ở đâu? Nguồn nhiệt động lực phải ở bên ngoài hệ mà ta đang nói đến, tức là bên trong *môi trường* của nó. Thật vậy, ta đã biết từ thực nghiệm rằng một môi trường điển hình thì lớn và được đặc trưng bằng một nhiệt độ. Một số thí dụ đã được liệt kê trong Bảng 6. Tóm lại,

▷ Một môi trường bất kỳ là một nguồn nhiệt động lực.

Ta có thể tiến xa hơn: đối với một tình trạng thực nghiệm thì có một nguồn nhiệt động

lực *tương tác* với hệ đang xét. Thật vậy, không có hệ nào cô lập, vì nó phải tương tác với ít nhất một quan sát viên; và mỗi quan sát viên theo định nghĩa đều chứa một nguồn nhiệt động lực, như ta sẽ chứng minh chi tiết sau đây. Thường thường nguồn nhiệt động lực quan trọng nhất mà ta phải tính đến là khí quyển bao quanh hệ, bức xạ hay trường điện từ tương tác với hệ, hay hệ đủ lớn để có nhiệt độ riêng, các bậc tự do của hệ sẽ không được bao gồm trong sự chồng chập mà ta đang xem xét.

Vì mọi hệ vật lý đều tiếp xúc với một nguồn nhiệt động lực, mọi matrix mật độ của sự chồng chập vĩ mô sẽ mất dần các phần tử trên đường chéo. Thoạt nhìn thì hướng suy nghĩ này không thuyết phục cho lắm. Sự tương tác của hệ với môi trường có thể giảm thiểu bằng cách sử dụng cách sắp đặt thí nghiệm thông minh; điều đó hàm ý rằng thời gian để mất điều hợp có thể tăng lên rất nhiều. Như vậy ta cần kiểm tra xem cần bao nhiêu thời gian để một chồng chập trạng thái mất điều hợp. Hoá ra có 2 phương thức tiêu chuẩn để ước tính *thời gian mất điều hợp*: bằng cách mô hình nguồn nhiệt động lực là một số lớn các hạt va chạm với nhau hoặc bằng cách mô hình nó là một trường liên tục.

Nếu nguồn nhiệt động lực được mô tả như một tập hợp các hạt va chạm ngẫu nhiên với hệ vi mô thì tốt nhất ta nên đặc trưng nó bằng một bước sóng hiệu dụng λ_{eff} của các hạt và một thời gian trung bình giữa 2 va chạm t_{hit}. Việc tính toán trực tiếp chứng tỏ rằng thời gian mất điều hợp t_d trong mọi trường hợp đều tuân theo hệ thức

$$t_d \leqslant t_{\text{hit}} = \frac{1}{\varphi\sigma}\,, \tag{73}$$

trong đó φ là thông lượng hạt và σ là thiết diện ngang của va chạm.* Các giá trị điển hình được cho trong Bảng 6. Ta cũng nhận thấy rằng đối với các vật vĩ mô, thời gian mất điều hợp rất ngắn (và các hiệu ứng hạt nhân, hấp dẫn khiến cho thời gian mất điều hợp lớn và có thể bỏ qua.) *Sự tán xạ khiến cho hệ vĩ mô mất điều hợp nhanh.* Tuy vậy, đối với nguyên tử hay các hệ nhỏ hơn, tình trạng sẽ khác đi. *Các hệ vi mô có thể có thời gian mất điều hợp dài hơn.*

Ta cũng nên lưu ý là lượng tử tác dụng $\hbar$ xuất hiện trong biểu thức của thời gian mất điều hợp, vì nó xuất hiện trong diện tích σ. Sự mất điều hợp là một quá trình lượng tử.

Cách mà nguồn nhiệt động lực làm mất điều hợp – sự hồi phục

Phương pháp thứ nhì để ước tính thời gian mất điều hợp cũng hay được sử dụng. Một tương tác của hệ với nguồn nhiệt động lực được mô tả bằng thời gian hồi phục t_r. Thuật ngữ *hồi phục* được sử dụng để gọi tên quá trình trở lại trạng thái cân bằng. Người ta cũng

* Có thể suy ra thời gian mất điều hợp bằng cách xem xét sự tiến hoá của matrix mật độ $\rho(x, x')$ của các vật định xứ tại hai điểm x và x'. Người ta tìm được các phần tử ngoài đường chéo là $\rho(x, x', t) = \rho(x, x', 0)\mathrm{e}^{-\Lambda t(x-x')^2}$, trong đó tốc độ định xứ Λ được cho bởi công thức

$$\Lambda = k^2\varphi\sigma_{\text{eff}} \tag{74}$$

Xem 98 k là số sóng, φ là thông lượng và σ_{eff} là thiết diện ngang của va chạm, thường là kích thước của vật vĩ mô.

Người ta cũng tìm được một kết quả đáng ngạc nhiên là một hệ nếu bị một hạt có năng lượng E_{hit} chạm Xem 99 phải sẽ *làm suy sụp* matrix mật độ xuống đến mức bước sóng de Broglie (nhiệt) của hạt va chạm. Từ hai kết quả này ta được công thức trên.

BẢNG 6 Các nguồn nhiệt động lực bình thường và khác thường cùng với các tính chất chính của chúng.

Kiểu nguồn	Nhiệt độ	Bước sóng	Thông lượng hạt	Thiết diện ngang (nguyên tử)	Thời gian va chạm $1/\sigma\varphi$ đối với	
	T	λ_{eff}	φ	σ	nguyên tử[a]	banh[a]
nguồn vật chất						
chất rắn, chất lỏng	300 K	10 pm	10^{31} /m^{2}s	10^{-19} m^2	10^{-12} s	10^{-25} s
không khí	300 K	10 pm	10^{28} /m^{2}s	10^{-19} m^2	10^{-9} s	10^{-22} s
chân không trong phòng thí nghiệm	50 mK	10 μm	10^{18} /m^{2}s	10^{-19} m^2	10 s	10^{-12} s
nguồn photon						
ánh mặt trời	5800 K	900 nm	10^{23} /m^{2}s		10^{-4} s	10^{-17} s
'bóng tối'	300 K	20 μm	10^{21} /m^{2}s		10^{-2} s	10^{-15} s
vi ba vũ trụ	2.7 K	2 mm	10^{17} /m^{2}s		10^{2} s	10^{-11} s
sóng vô tuyến mặt đất						
hiệu ứng Casimir					rất lớn	
Bức xạ Unruh của Trái đất	40 zK				rất lớn	
nguồn bức xạ hạt nhân						
phóng xạ		10 fm	1 /m^{2}s	10^{-25} m^2	10^{25} s	10^{12} s
bức xạ vũ trụ	>1000 K	10 fm	10^{-2} /m^{2}s	10^{-25} m^2	10^{27} s	10^{14} s
neutrino mặt trời	≈ 10 MK	10 fm	10^{11} /m^{2}s	10^{-47} m^2	10^{36} s	10^{15} s
neutrino vũ trụ	2.0 K	3 mm	10^{17} /m^{2}s	10^{-62} m^2	10^{45} s	10^{24} s
nguồn hấp dẫn						
bức xạ hấp dẫn	$5 \cdot 10^{31}$ K	10^{-35} m			rất lớn	

a. Giá trị ước lượng thô. Quả banh vĩ mô giả sử có kích thước 1 mm.

hay sử dụng thuật ngữ *tắt dần* và *ma sát*. Trong trường hợp đang đề cập, thời gian hồi phục mô tả sự trở lại trạng thái cân bằng của một tổ hợp hệ thống và nguồn nhiệt động lực. Sự hồi phục là một thí dụ của một sự tiến hoá không thuận nghịch. Một quá trình được gọi là *không thuận nghịch* nếu quá trình đảo ngược, trong đó mọi thành phần đều chuyển động theo hướng ngược lại, có xác suất rất nhỏ.* Thí dụ, thường thường một ly rượu vang đổ vào trong một chén nước sẽ nhuộm màu chén nước đó; rất hiếm khi ta thấy rượu và nước tách rời nhau như trước, vì xác suất để các phân tử nước và phân tử rượu đổi hướng cùng lúc rất nhỏ, một điều làm cho các nhà sản xuất rượu vang hạnh phúc và những người tiêu thụ rượu vang tuyệt vọng.

* Hãy thận trọng với các định nghĩa khác làm cho mọi điều lạc ra ngoài khái niệm 'tính không thuận nghịch' như nói rằng 'không thuận nghịch' có nghĩa là quá trình đảo ngược *không thể* xảy ra. Có nhiều 'mâu thuẫn' như vậy giữa tính không thuận nghịch của các quá trình và tính thuận nghịch của các phương trình tiến hoá bắt nguồn từ sự diễn giải sai lầm thuật ngữ 'không thuận nghịch' này.

Bây giờ ta hãy đơn giản hoá việc mô tả nguồn nhiệt động lực. Ta mô tả nó một cách gần đúng bằng một trường đơn giản, không đặc tả, vô hướng, tương tác với hệ lượng tử. Do tính liên tục của không gian, một trường như vậy có vô số bậc tự do. Chúng được dùng để mô hình các bậc tự do của nguồn nhiệt động lực. Trường này được giả sử là đang ở trong một trạng thái ban đầu và bậc tự do của nó được kích thích theo một phương thức có thể mô tả bằng nhiệt độ T. Sự tương tác của hệ với nguồn, khi quá trình hồi phục bắt đầu, có thể được mô tả bằng cách truyền đều đặn các phần năng lượng nhỏ E_{hit} cho đến khi quá trình hồi phục kết thúc.

Các vật mà ta quan tâm trong phần này như con mèo, người hay xe, đều được mô tả bằng một khối lượng m. Đặc trưng chính của các vật đó là năng lượng cực đại E_r có thể truyền từ hệ ra bên ngoài. Năng lượng này mô tả sự tương tác giữa hệ và môi trường. Sự chồng chập của các trạng thái vĩ mô mà ta quan tâm là lời giải của phương trình tiến hoá Hamilton của hệ.

Sự điều hợp lúc ban đầu của sự chồng chập, khác xa với kinh nghiệm thường ngày của ta, giảm theo hàm mũ trong *thời gian mất điều hợp* t_d được cho bởi công thức *

Xem 100

$$t_d = t_r \frac{E_{\text{hit}}}{E_r} \frac{e^{E_{\text{hit}}/kT} - 1}{e^{E_{\text{hit}}/kT} + 1} \qquad (77)$$

trong đó k là *hằng số Boltzmann* và như trên, E_r là năng lượng cực đại có thể truyền từ hệ ra môi trường. Nên nhớ rằng ta luôn luôn có $t_d \leqslant t_r$. Sau khi thời gian mất điều hợp t_d trôi qua, hệ đã tiến hoá từ sự chồng chập các trạng thái điều hợp sang không điều hợp, hay nói cách khác, matrix mật độ đã mất các phần tử ngoài đường chéo. Ta cũng có thể nói rằng sự điều hợp phase của hệ đã bị phá huỷ. Như vậy, sau thời gian t_d, ta sẽ thấy hệ hoặc ở trong trạng thái ψ_a hoặc trạng thái ψ_b, tương ứng với xác suất $|a|^2$ hay $|b|^2$ và không còn sự chồng chập điều hợp chứa quá nhiều mâu thuẫn với kinh nghiệm quen thuộc của chúng ta. Trạng thái sau cùng được lựa chọn tuỳ thuộc vào trạng thái chính xác của nguồn nhiệt động lực, lược bỏ các tính toán chi tiết bằng cách lấy *trung bình* trên các trạng thái của các thành phần vi mô của nó.

Kết quả quan trọng là đối với tất cả các vật *vĩ mô*, thời gian mất điều hợp t_d cực nhỏ. Để hiểu rõ hơn, ta có thể nghiên cứu một trường hợp đơn giản hoá đặc biệt. Một vật vĩ mô có khối lượng m, như một con mèo hay một cái xe, được giả sử là đồng thời ở hai vị trí cách nhau một khoảng l, tức là ở trong một sự chồng chập của 2 trạng thái tương ứng. Ta giả sử thêm là sự chồng chập này bắt nguồn từ sự di chuyển của vật giống như

* Kết quả này được suy ra giống như trường hợp trên. Một hệ tương tác với một nguồn nhiệt động lực luôn luôn có một độ tiến hoá cho dưới dạng tổng quát là

Xem 101

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t} = -\frac{i}{\hbar}[H,\rho] - \frac{1}{2t_o}\sum_j [V_j\rho, V_j^\dagger] + [V_j, \rho V_j^\dagger] \,, \qquad (75)$$

trong đó ρ là matrix mật độ, H là Hamiltonian, V là thế tương tác, và t_o là thời gian đặc trưng của sự tương tác. Bạn có thể hiểu tại sao không? Giải phương trình này, ta tìm thấy đối với các phần tử xa đường chéo thì $\rho(t) = \rho_0 e^{-t/t_0}$. Nói cách khác, chúng biến mất với thời gian đặc trưng là t_o. Trong đa số các trường hợp ta có một hệ thức có dạng

Câu đố 108 ny

$$t_0 = t_r \frac{E_{\text{hit}}}{E_r} = t_{\text{hit}} \qquad (76)$$

hay một số dạng khác như trong thí dụ trên.

một dao động tử cơ lượng tử với tần số ω giữa 2 vị trí; đây là một hệ khả hữu đơn giản nhất biểu diễn sự chồng chập của một vật ở 2 vị trí khác nhau. Năng lượng của vật lúc đó được cho bởi công thức $E_r = m\omega^2 l^2$, và năng lượng truyền nhỏ nhất là $E_{\text{hit}} = \hbar\omega$ là hiệu giữa hai mức năng lượng của dao động tử. Trong trường hợp vĩ mô, năng lượng sau cùng này rất nhỏ so với kT, vì vậy từ biểu thức trước ta kiếm được

Xem 102

$$t_d = t_r \frac{E_{\text{hit}}^2}{2E_r kT} = t_r \frac{\hbar^2}{2mkTl^2} = t_r \frac{\lambda_T^2}{l^2} \tag{78}$$

trong đó tần số ω đã biến mất. Đại lượng $\lambda_T = \hbar/\sqrt{2mkT}$ được gọi là *bước sóng de Broglie nhiệt* của hạt.

Ta nên chú ý là lượng tử tác dụng $\hbar$ lại xuất hiện trong biểu thức của thời gian mất điều hợp. Sự mất điều hợp là một quá trình lượng tử.

Có thể thấy ngay rằng đối với các vật vĩ mô trong thực tế thì thời gian mất điều hợp điển hình t_d cực ngắn. Thí dụ như cho $m = 1$ g, $l = 1$ mm và $T = 300$ K ta có $t_d/t_r = 1.3 \cdot 10^{-39}$. Mặc dù sự tương tác giữa hệ và môi trường yếu đến nỗi hệ sẽ có thời gian hồi phục bằng tuổi của vũ trụ, tức là khoảng $4 \cdot 10^{17}$ s, thời gian t_d vẫn còn ngắn hơn $5 \cdot 10^{-22}$ s, tức là nhanh hơn thời gian dao động của một chùm ánh sáng trên một triệu lần (khoảng 2 fs đối với ánh sáng lục). Đối với con mèo của Schrödinger, thời gian mất điều hợp thậm chí còn ngắn hơn. Nó ngắn đến nỗi ta sẽ không kịp *chuẩn bị* cho trạng thái chồng chập điều hợp ban đầu chứ đừng nói đến việc quan sát sự phân rã hay đo thời gian sống của nó.

Tuy vậy đối với hệ vi mô, tình thế sẽ khác đi. Đối với một electron trong chất rắn được làm lạnh tới nhiệt độ của helium lỏng, ta có $m = 9.1 \cdot 10^{-31}$ kg, $l = 1$ nm và $T = 4$ K; lúc đó ta sẽ kiếm được $t_d \approx t_r$ và hệ vẫn còn ở trong trạng thái chồng chập điều hợp cho đến khi nó hồi phục, chứng tỏ rằng trong trường hợp này hiệu ứng điều hợp có thể quan sát được nếu hệ được giữ cô lập. Một thí dụ điển hình là hành trạng của electron trong chất siêu dẫn.

Xem 103

Năm 1996, thí nghiệm đo thời gian mất điều hợp thực sự và đầu tiên, đã được nhóm Paris do Serge Haroche lãnh đạo, công bố. Thí nghiệm khẳng định mối liên hệ giữa thời gian mất điều hợp và thời gian hồi phục, và như vậy nó chứng tỏ rằng 2 quá trình phải phân biệt được ở thang đo vi mô. Trong thời gian đó, nhiều thí nghiệm khác đã khẳng định quá trình mất điều hợp với phương trình tiến hoá của nó, cả giá trị nhỏ và lớn của t_d/t_r. Trong một thí nghiệm ngoạn mục, được thực hiện vào năm 2004, người ta đã quan sát được sự biến mất của hiện tượng giao thoa 2 khe đối với các phân tử C_{70} khi một nguồn nhiệt động lực tương tác với chúng.

Xem 104
Xem 105
Xem 106

Tóm tắt về sự mất điều hợp, sinh và tử

Việc tìm hiểu về cái chết đã cho ta thấy rằng *sự mất điều hợp là kết quả của sự liên kết với một nguồn nhiệt động lực trong môi trường.* Sự mất điều hợp là một hiệu ứng thống kê lượng tử, tức là hiệu ứng nhiệt động lực. Được suy ra từ Thuyết lượng tử, nó là một quá trình không thuận nghịch và xảy ra một cách tự động. Điều quan trọng là người ta đã quan sát được quá trình này trong các thí nghiệm.

Việc ước tính thời gian mất điều hợp trong đời sống hằng ngày cho ta thấy rằng cả sự chuẩn bị lẫn tàn dư của sự chồng chập các trạng thái vĩ mô khác biệt đều *không thể* thực

hiện được bằng sự tương tác với nguồn nhiệt động lực được tìm thấy trong môi trường. Đây đúng là trường hợp ta gặp ngay cả khi ma sát của chuyển động của hệ rất nhỏ. Dù hệ vĩ mô chịu rất ít ma sát khiến cho thời gian hồi phục rất dài thì thời gian mất điều hợp của nó vẫn rất ngắn. Chỉ có những hệ vi mô được thiết kế cẩn thận trong các phòng thí nghiệm đắt tiền mới có thể đạt đến thời gian mất điều hợp đáng kể.

Môi trường thường ngày quanh ta đầy các nguồn nhiệt động lực. Do đó

▷ Sự chồng chập điều hợp của các trạng thái vĩ mô phân biệt không bao giờ xuất hiện trong đời sống hằng ngày vì thời gian mất điều hợp, phát sinh bởi các nguồn nhiệt động lực trong môi trường, rất ngắn.

Xe không thể ở trong và ngoài garage cùng một lúc. Ta không thể vừa còn vừa mất. Minh hoạ cho sự chồng chập vĩ mô – xem Hình 105 – không thể có. Phù hợp với sự giải thích, sự chồng chập điều hợp của các trạng thái vĩ mô xuất hiện trong một số thí nghiệm đặc biệt.

Trang 156

Hệ là gì? Vật là gì?

Trong vật lý cổ điển, hệ là một phần của thiên nhiên có thể được cô lập với môi trường của nó. Tuy vậy, cơ học lượng tử cho ta biết là không có hệ cô lập vì không thể khử bỏ sự tương tác. Có thể giải quyết mâu thuẫn này bằng các kết quả tìm được ở trên: chúng cho phép ta định nghĩa khái niệm hệ chính xác hơn.

▷ *Hệ* là một phần của thiên nhiên tương tác *không điều hợp* với môi trường của nó.

Điều này hàm ý:

▷ *Vật* là một phần của thiên nhiên chỉ tương tác với môi trường thông qua các nguồn nhiệt động lực.

Đặc biệt, ta có:

▷ Một hệ được gọi là *vi mô* hay *cơ lượng tử* và có thể mô tả bằng một hàm sóng ψ khi
— nó gần như cô lập với $t_{\text{evol}} = \hbar/\Delta E < t_{\text{r}}$, và
— nó tương tác *không điều hợp* với môi trường của nó.

Xem 107

Tóm lại, một hệ cơ lượng tử/vi mô có thể được mô tả bằng một hàm sóng chỉ khi nó tương tác không điều hợp và yếu với môi trường của nó. (Đối với một hệ như vậy, độ bất định năng lượng ΔE lớn hơn năng lượng hồi phục.) Trái lại, một nguồn nhiệt động lực không bao giờ bị cô lập theo nghĩa ta vừa nói vì thời gian tiến hoá của nó, theo thang thời gian mà tính chất của nó thay đổi, luôn luôn lớn hơn thời gian hồi phục của nó. Vì tất cả các vật vĩ mô đều tiếp xúc với các nguồn nhiệt động lực – hay ngay cả chứa luôn một nguồn – nên ta không thể mô tả chúng bằng một hàm sóng. Đặc biệt, ta không thể mô tả một dụng cụ đo bất kỳ bằng một hàm sóng.

Như vậy ta có thể kết luận:

▷ Một *hệ vĩ mô* là một hệ có thời gian mất điều hợp rất nhỏ so với thời gian tiến hoá của các thành phần của nó.

Điều hiển nhiên là các hệ vĩ mô cũng tương tác không điều hợp với môi trường của nó. Như vậy, mèo, xe và thông tín viên TV đều là các hệ vĩ mô.

Sự liên đới

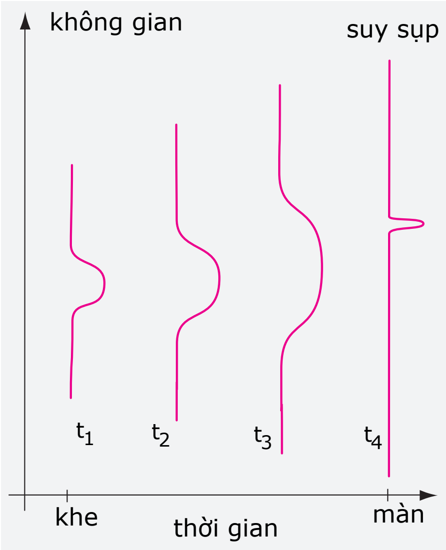
Qua hai định nghĩa của hệ còn lại một khả năng: điều gì sẽ xảy ra trong trường hợp tương tác với môi trường có tính *điều hợp*? Theo định nghĩa thì chúng không phải là hệ vi mô lẫn vi mô.

▷ Một 'hệ' tương tác điều hợp với môi trường của nó được gọi là 'hệ' *liên đới*.

Các 'hệ' như vậy không được mô tả bằng một hàm sóng, và nói một cách chặt chẽ, chúng *không phải là* hệ. Trong trường hợp này, khi tương tác có tính điều hợp, ta đang nói về *sự liên đới*. Lúc đó ta nói rằng một hạt hay một tập hợp hạt *liên đới* với môi trường của nó.

Ta có thể phân chia các hệ tương tác điều hợp, tức là hệ liên đới, nhưng để làm được như vậy ta cần gỡ bỏ sự liên đới. Tác động phân chia tạo ra các thực thể tách rời; các thực thể tách rời tương tác không điều hợp với nhau. Thuyết lượng tử chứng tỏ rằng thiên nhiên không do các thực thể tách rời tạo nên mà được tạo thành từ các thực thể *có thể tách rời*. Trong Thuyết lượng tử, tiêu chuẩn của sự tách rời là tính không điều hợp của sự tương tác. Sự chồng chập điều hợp cho ta các hệ quả đáng kinh ngạc thí dụ như có những hệ mặc dù nhìn có vẻ do các phần tách rời tạo nên nhưng không phải. Sự liên đới đặt ra một giới hạn cho sự tách rời. Mọi tính chất kỳ lạ của cơ học lượng tử như con mèo của Schrödinger, là hệ quả của thành kiến cổ điển cho rằng một hệ gồm hai hay nhiều phần thì có thể tách thành hai hệ con mà không gây ra nhiễu loạn gì. Nhưng sự chồng chập điều hợp, hay các hệ liên đới, không cho phép sự tách rời không nhiễu loạn. Khi ta giả sử rằng có thể tách rời hệ liên đới, ta đã có một kết luận kỳ dị hay không đúng, giống như sự lan truyền nhanh hơn ánh sáng, hay theo ngôn ngữ hiện đại, hành vi không định xứ. Ta hãy xem một vài thí dụ điển hình.

Người ta đã quan sát được sự liên đới trong nhiều thí nghiệm. Thí dụ như khi một electron và một positron huỷ biến thành 2 photon, có phân cực liên đới, mà người ta đã đo được năm 1949. Hay khi một nguyên tử bị kích thích phân rã dây chuyền, phát ra 2 photon, có sự phân cực liên đới, gặp lần đầu tiên năm 1966 trong nguyên tử calcium. Tương tự như vậy, khi một phân tử không bền trong một trạng thái đơn, tức là trong trạng thái có spin 0, phân rã thành nhiều mảnh, spin của các mảnh có liên đới với nhau, đã được quan sát vào thập niên 1970s. Sự biến đổi tham số tự phát giảm của photon cũng sinh ra sự liên đới. Trong một quang chất phi tuyến, một photon tới được biến đổi thành 2 photon có tổng năng lượng tương đương với năng lượng của photon tới. Trong trường hợp này, hai photon phát ra có phân cực và hướng liên đới với nhau. Năm 2001, spin của hai mẫu hơi caesium cực lạnh, mỗi mẫu có hàng triệu nguyên tử, cách nhau vài mm, có liên đới với nhau. Người ta cũng đã quan sát được sự liên đới vị trí, thí dụ như các ion



HÌNH 73 Chuyển động cơ lượng tử: một hàm sóng electron (thật ra là bình phương của module) từ lúc nó đi ngang qua khe cho đến khi nó chạm màn.

rất gần nhau trong các bẫy ion.

Có phải Thuyết lượng tử có tính không định xứ không? Sơ lược về nghịch lý Einstein–Podolsky–Rosen

> “[Mr. Duffy] đã sống hơi xa thân thể của mình ...”
>
> James Joyce, *A Painful Case*

Người ta thường đề xuất một cách sai lầm rằng sự suy sụp của hàm sóng hay Thuyết lượng tử có tính không định xứ.* Ta cần làm sáng tỏ điều này.

Ta bắt đầu bằng cách tưởng tượng ra một electron chạm vào một cái màn sau khi đi ngang qua một cái khe. Theo sự mô tả vừa đề cập, quá trình suy sụp diễn ra theo sơ đồ vẽ trong Hình 73. Một hoạt hình bao gồm một thí dụ của quá trình suy sụp – lấy cảm hứng từ thí nghiệm tưởng tượng của Bohm – mà bạn có thể nhìn thấy ở góc trái bên dưới của những trang này, bắt đầu từ Trang 116. Quá trình suy sụp này có một điều kỳ lạ: do sự ngắn ngủi của thời gian điều hợp, trong sự suy sụp của hàm sóng này (và các hàm bất kỳ khác) cực đại của hàm sóng thường thay đổi vị trí nhanh hơn ánh sáng. Điều này có hợp lý không?

Trang 155

Một tình trạng được gọi là *không có tính nhân quả* hay *không định xứ* nếu năng lượng được vận chuyển nhanh hơn ánh sáng. Sử dụng Hình 73 bạn có thể xác định vận tốc năng lượng bằng cách lấy kết quả của việc truyền tín hiệu. Giá trị này nhỏ hơn c. Một hàm sóng chuyển động nhanh hơn ánh sáng *không tự động* có nghĩa là năng lượng chuyển động nhanh hơn ánh sáng.

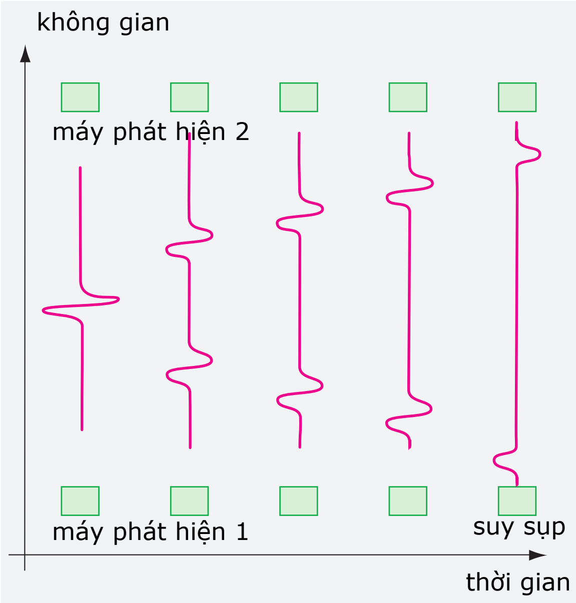
Câu đố 109 s
Quyển III, trang 131

Nói cách khác, Thuyết lượng tử chứa tốc độ lớn hơn tốc độ ánh sáng nhưng *tốc độ năng lượng* không lớn hơn tốc độ ánh sáng. Trong Điện động lực học cổ điển, điều tương

Xem 108

* Điều này tiếp theo một chủ đề mà ta đã biết: trước kia ta đã tìm hiểu một kiểu không định xứ khác trong Thuyết tương đối tổng quát.

Quyển II, trang 289



HÌNH 74 Thí nghiệm tưởng tượng của Bohm.

tự xảy ra cho thế vô hướng và thế vector nếu ta sử dụng chuẩn Coulomb. Ta đã gặp tốc độ lớn hơn tốc độ ánh sáng trong chuyển động của cái bóng và cái kéo và trong nhiều hiện tượng khác. Bây giờ vật lý gia có 2 lựa chọn: anh ta có thể trung thực và nói rằng có tính định xứ trong thiên nhiên; hay ít trung thực hơn một chút và cho rằng không có. Trong trường hợp sau, anh ta phải nói rằng Vật lý cổ điển đúng là không có tính định xứ. Tuy vậy, không ai dám tuyên bố như thế vì có sự nguy hiểm trong việc sử dụng thuật ngữ 'không định xứ': một số ít người cho rằng thế giới không định xứ thì sau một lúc lại tin rằng thực sự có việc vận chuyển năng lượng nhanh hơn ánh sáng trong thiên nhiên. Những người này sa lầy trong những suy nghĩ rối rắm của mình. Mặt khác, những tư tưởng lộn xộn lại dễ dàng đưa lên báo. Tóm lại, dù định nghĩa của tính không định xứ chưa được nhất trí, ở đây ta vẫn bám vào định nghĩa chặt chẽ hơn, tính không định xứ là sự vận chuyển *năng lượng* nhanh hơn ánh sáng.

Quyển II, trang 61

Một thí nghiệm tưởng tượng thường được trích dẫn do Bohm đề xuất trong khi bàn luận về nghịch lý Einstein–Podolsky–Rosen đã cho thấy các cạm bẫy của tính không định xứ. * Trong bài báo nổi tiếng của EPR ba tác giả đã cố gắng tìm ra sự mâu thuẫn giữa Vật lý lượng tử và nhận thức thông thường. Bohm đã chuyển đổi bài báo rắc rối của họ thành một thí nghiệm tưởng tượng rõ ràng được biểu diễn bằng sơ đồ trong Hình 74. Khi 2 hạt trong một trạng thái có spin 0 tách ra, việc đo hướng spin của một hạt sẽ tạo ra một suy sụp *tức thời* của spin của hạt kia, cụ thể là có hướng ngược lại. Việc này xảy ra tức thời trên cả khoảng phân cách; ở đây không có giới hạn tốc độ. Nói cách khác, sự liên đới hình như làm cho sự truyền thông nhanh hơn ánh sáng có thể xảy ra.

Xem 109, Xem 110

Tuy vậy, trong thí nghiệm Bohm, không có năng lượng được vận chuyển nhanh hơn

* David Joseph Bohm (1917–1992), là một nhà vật lý có uy tín. Ông đã đồng khám phá ra hiệu ứng Aharonov–Bohm và dành một phần lớn cuộc đời mình để nghiên cứu sự kết nối giữa Vật lý lượng tử và Triết học.

ánh sáng. Không có tính không định xứ ở đây, mặc dù có nhiều tác giả tuyên bố ngược lại. Hai electron liên đới thuộc về cùng một hệ: giả sử chúng bị tách rời chỉ vì hàm sóng có hai cực đại xa nhau là một sai lầm về mặt nhận thức. Đúng ra không có tín hiệu nào có thể được truyền đi bằng phương pháp này; sự mất điều hợp này là thí dụ về sự tiên đoán về một vật trông giống như tín hiệu nhưng không phải. Thí nghiệm Bohm, giống như một thí nghiệm kiểu EPR khác, không cho phép việc truyền tín hiệu nhanh hơn ánh sáng. Ta đã bàn đến các trường hợp như vậy trong phần Điện động lực học.

Quyển III, trang 136
Xem 111

Người ta đã thực hiện được thí nghiệm Bohm. Thí nghiệm đầu tiên và nổi tiếng nhất được Alain Aspect thực hiện năm 1982; ông sử dụng các photon thay vì electron. Giống như các thí nghiệm sau đó, nó đã khẳng định Cơ học lượng tử một cách hoàn toàn.

Đúng ra những thí nghiệm như thí nghiệm của Aspect chứng tỏ rằng ta không thể xem một hạt trong hệ 2 hạt là một hệ vì ta không thể gán cho chúng một tính chất vật lý nào, như hướng của spin chẳng hạn. (Bức tranh của Heisenberg sẽ diễn tả điều ràng buộc này rõ ràng hơn.) Chỉ có một cặp electron mới tạo thành một hệ vật lý, vì chỉ có một cặp thì mới tương tác không điều hợp với môi trường.

Ta có thể bỏ qua hai thí dụ về tính không định xứ biểu kiến đề cập ở trên vì chúng không có liên quan tới các dòng năng lượng nhanh hơn ánh sáng nên cũng không có vấn đề gì với tính nhân quả. Thí dụ sau đây sẽ thú vị hơn. Lấy 2 nguyên tử giống nhau, một ở trạng thái kích thích, một ở trạng thái cơ bản và gọi l là khoảng cách giữa chúng. Theo nhận thức thông thường nếu nguyên tử đầu tiên trở về trạng thái cơ bản và phát ra một photon, nguyên tử thứ hai chỉ có thể bị kích thích sau thời gian $t = l/c$, tức là sau khi photon đã chuyển động tới nguyên tử thứ hai.

Điều đáng ngạc nhiên là kết luận này sai. Xác suất để nguyên tử ở trạng thái cơ bản bị kích thích cùng lúc với nguyên tử một trở về trạng thái cơ bản, khác không. Điều này đã được Gerhard Hegerfeldt chứng minh và đã được thí nghiệm khẳng định.

Xem 112

Việc nghiên cứu kỹ hơn cho ta thấy kết quả tuỳ thuộc vào kiểu chồng chập hai nguyên tử lúc bắt đầu: điều hợp hay không điều hợp. Nếu chồng chập không điều hợp, kết quả theo trực giác đúng; ta chỉ gặp kết quả phản trực giác khi sự chồng chập có điều hợp. Việc bàn luận thấu đáo cho ta thấy rằng thực tế ở đây không có năng lượng không định xứ.

Tóm lại, tốc độ suy sụp của hàm sóng lớn hơn tốc độ ánh sáng không có gì mâu thuẫn với tốc độ năng lượng trong Thuyết tương đối đặc biệt. Tốc độ suy sụp là vận tốc phase. Trong thiên nhiên, vận tốc phase không bị giới hạn; vận tốc phase không giới hạn không có nghĩa là sự vận chuyển năng lượng sẽ nhanh hơn ánh sáng. Hơn nữa, ta tìm lại được kết quả: chỉ có thể xác định được các hệ vật lý nếu chúng tương tác không điều hợp với môi trường của chúng.

Các câu đố vui và lạ về sự chồng chập

Có người đã phát biểu một cách sai lầm là các nguyên tử trong trạng thái chồng chập của 2 trạng thái tập trung tại các vị trí khác nhau thì ta có thể ghi hình lại được. (Có một số sách sử dụng điều ba xạo này để làm cho người ta tin.) Tại sao điều này không đúng?

Câu đố 110 s

* *

Trong một số trường hợp, sự chồng chập của các trạng thái vĩ mô khác nhau có thể quan sát được nhờ hạ thấp nhiệt độ tới giá trị đủ nhỏ và bằng cách chọn cẩn thận các

khối lượng hay khoảng cách thích hợp. Hai thí dụ nổi tiếng về sự chồng chập điều hợp đã được quan sát thấy trong máy phát hiện sóng hấp dẫn và trong lớp chuyển tiếp Josephson. Trong trường hợp đầu, người ta quan sát một vật nặng 1000 kg trong trạng thái chồng chập các trạng thái ở những điểm khác nhau trong không gian: khoảng cách giữa chúng cỡ 10^{-17} m. Trường hợp 2, trong các vòng siêu dẫn, là sự chồng chập của một trạng thái trong đó dòng vĩ mô có cỡ 1 pA chạy theo chiều kim đồng hồ với trạng thái có dòng cảm ứng chạy theo chiều ngược lại.

Xem 102
Xem 113

* *

Sự chồng chập của sự từ hoá theo hướng đi lên và đi xuống đồng thời đã được quan sát thấy trong nhiều chất.

Xem 114

* *

Từ những năm 1990s, môn thể thao tìm kiếm và vui đùa với các hệ ở trong trạng thái chồng chập vĩ mô điều hợp đã lan ra trên khắp thế giới. Thách thức nằm trong các thí nghiệm đòi hỏi chính xác. Các thí nghiệm với các nguyên tử đơn lẻ trong trạng thái chồng chập là các thí nghiệm phổ biến nhất.

Xem 115
Xem 116

* *

Năm 1997, sóng nguyên tử điều hợp đã được trích xuất từ đám mây của các nguyên tử Natrium.

Xem 117

* *

Các vật vĩ mô thường ở trong các trạng thái không điều hợp. Điều này giống trường hợp của ánh sáng. Thế giới đầy ánh sáng không điều hợp 'vĩ mô': ánh sáng ban ngày, ánh sáng của các ngọn đèn, lửa và ánh sáng của đom đóm là ánh sáng không điều hợp. Chỉ có các nguồn rất đặc biệt và được chế tạo một cách tỉ mỉ, như laser hay các nguồn điểm, mới phát ra ánh sáng điều hợp. Các nguồn này cho phép ta nghiên cứu hiệu ứng giao thoa. Đúng ra thuật ngữ 'điều hợp' và 'không điều hợp' bắt nguồn từ quang học, vì đối với ánh sáng, sự khác nhau giữa hai khả năng giao thoa, đã được quan sát trước trường hợp của vật chất nhiều thế kỷ.

Sự điều hợp và không điều hợp của ánh sáng và vật chất thể hiện khác nhau, vì vật chất có thể đứng yên còn ánh sáng thì không và vì vật chất được tạo thành từ fermion, còn ánh sáng là từ boson. Người ta có thể dễ dàng quan sát được sự điều hợp trong các hệ bao gồm các boson như ánh sáng, âm thanh trong chất rắn hay các cặp electron trong chất siêu dẫn. Trong các hệ của fermion, sự điều hợp khó quan sát hơn như hệ các nguyên tử với các đám mây điện tử. Tuy vậy, trong cả 2 trường hợp ta đều có thể xác định thời gian mất điều hợp. Trong hệ nhiều hạt, người ta có thể quan sát sự điều hợp rõ nhất nếu mọi hạt có cùng trạng thái (hiện tượng siêu dẫn, laser) và sự chuyển từ điều hợp sang mất điều hợp là do sự tương tác với một nguồn nhiệt động lực. Một chùm hạt sẽ mất điều hợp nếu các hạt của nó tới nơi một cách ngẫu nhiên về mặt thời gian và tần số. Trong đời sống hằng ngày, việc ít thấy sự chồng chập vật chất điều hợp có cùng nguyên nhân như trường hợp ít thấy ánh sáng điều hợp.

Trang 140

* *

Ta sẽ bàn về mối liên hệ giữa môi trường và *sự phân rã* của hệ không bền sau. Hiện tượng

Quyển V, trang 47

có thể được mô tả đầy đủ bằng sự mất điều hợp.

* *

Bạn có thể tìm ra phương pháp đo *mức độ* liên đới hay không? Bạn có thể làm như vậy đối với một hệ có nhiều hạt hay không?

* *

Câu đố 111 ny

Việc nghiên cứu sự liên đới cho ta một kết luận đơn giản: *sự viễn tải mâu thuẫn với sự tương quan*. Bạn có thể chứng minh điều này không?

* *

Câu đố 112 s

Có phải hiện tượng bóng ma trên TV, thường do sự phản xạ bị nhiễu, là thí dụ về hiện tượng giao thoa không?

* *

Câu đố 113 d

Điều gì sẽ xảy ra khi 2 electron đơn sắc phủ nhau?

* *

Xem 118

Câu đố 114 s

Một số người cho rằng có thể áp dụng Thuyết lượng tử vào việc tính toán lượng tử bằng cách sử dụng sự chồng chập điều hợp của các hàm sóng. Bạn có thể nêu ra một lý do tổng quát giải thích cho việc rất khó để đạt được mục đích này – mặc dù không phải là không thể – kể cả khi không biết máy tính lượng tử có hoạt động được hay *qubits* là cái gì hay không?

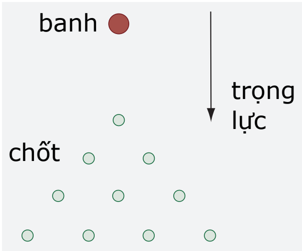
Tại sao xác suất và sự suy sụp của hàm sóng xuất hiện khi ta đo đạc?

Sự đo đạc trong cơ học lượng tử gây ra rắc rối cũng vì chúng dẫn tới các phát biểu trong đó xuất hiện khái niệm *xác suất*. Thí dụ như khi ta nói về xác suất tìm thấy một electron cách hạt nhân nguyên tử một khoảng nào đó. Ta sẽ thường gặp các phát biểu kiểu này 'khi ta đo biến động lực A, xác suất để tìm thấy giá trị a là p.' Trong phần sau đây ta sẽ chứng tỏ rằng đối với một phép đo bất kỳ, xác suất trong những mệnh đề như vậy là điều không thể tránh khỏi, vì như ta sẽ chứng minh, (1) mọi phép đo và quan sát đều là trường hợp đặc biệt của sự mất điều hợp hay quá trình mất liên đới và (2) mọi quá trình mất điều hợp đều dẫn tới khái niệm lượng tử tác dụng. (Về mặt lịch sử thì quá trình đo đạc được nghiên cứu *trước* quá trình mất điều hợp có tính tổng quát hơn. Điều này giải thích một phần lý do tại sao chủ đề này đối với nhiều người lại quá rắc rối như vậy.)

Quyển III, trang 266

Câu đố 115 s

Đo đạc là gì? Như đã nói trước kia, mỗi phép đo là một tương tác tạo ra một mẫu tin hay một ghi nhớ. (Mỗi tác động trong đời sống hằng ngày là một mẫu tin; nhưng tổng quát thì điều này không đúng. Bạn có thể cho vài thí dụ về các tác động là mẫu tin và một số không phải là mẫu tin hay không?) Các phép đo có thể do máy móc thực hiện; khi người đứng ra thực hiện thì ta gọi chúng là *các quan sát*. Trong Thuyết lượng tử, quá trình đo không trực tiếp như trong vật lý cổ điển. Đây được xem là điều đáng chú ý nhất khi một hệ lượng tử, như một electron riêng lẻ, lần đầu tiên được tạo ra để cho bay qua một khe nhiễu xạ – để ta có thể thấy được tính chất sóng của nó – hay tốt hơn, bay qua một khe kép rồi cho chạm vào một kính ảnh, để ta cũng thấy được tính chất hạt của nó.



HÌNH 75 Một hệ biểu diễn hành trạng có tính chất xác suất: quả banh rơi xuyên qua một mảng các cái chốt.

Thí nghiệm chứng tỏ rằng điểm đen, nơi electron chạm vào màn, không thể xác định trước. (Điều tương tự cũng đúng đối với photon hay các hạt bất kỳ khác.) Tuy vậy, khi số electron lớn, sự phân bố của các điểm đen, được gọi là *hình nhiễu xạ*, có thể tính toán trước với độ chính xác cao.

Kết quả thí nghiệm trên các hệ vi mô buộc ta sử dụng xác suất để mô tả chúng. Ta thấy rằng phân bố xác suất $p(\boldsymbol{x})$ của các điểm trên kính ảnh có thể được tính toán bằng hàm sóng ψ của electron tại vị trí màn và được cho bởi công thức $p(\boldsymbol{x}) = |\psi^\dagger(\boldsymbol{x})\psi(\boldsymbol{x})|^2$. Đúng ra đây là một trường hợp đặc biệt của *tính chất tổng quát đầu tiên của các phép đo lượng tử*:

▷ Việc đo một biến động lực A đối với một hệ trong trạng thái ψ có kết quả là một trong những trị riêng a_n, và xác suất P_n để có kết quả a_n được cho bởi công thức

$$P_n = |\varphi_n^\dagger \psi|^2 \,, \qquad (79)$$

trong đó φ_n là hàm riêng của toán tử A tương ứng với trị riêng a_n.*

Thí nghiệm cũng cho thấy *tính chất thứ hai của các phép đo lượng tử:*

▷ Sau một phép đo, hệ lượng tử được quan sát ở trong trạng thái φ_n tương ứng với giá trị riêng đã đo a_n. Ta cũng nói rằng trong phép đo, hàm sóng đã *suy sụp* từ ψ đến φ_n.

Xem 119

Hai tính chất thực nghiệm này cũng có thể được tổng quát hoá thành những trường hợp tổng quát hơn với các trị riêng liên tục và suy biến.

Dĩ nhiên là các kết quả thực nghiệm trong các quá trình đo cần một sự giải thích. Trước hết, loại xác suất mà ta gặp trong Thuyết lượng tử khác với xác suất ta gặp trong đời sống thông thường. Lấy trường hợp roulette, xí ngầu, hệ được biểu diễn trong Hình 75, máy pachinko hay hướng đổ của viết chì dựng đứng: tất cả các kết quả đo được đều có tính ngẫu nhiên (giả sử là không có sự gian lận của người thiết kế hay người vận hành)

* Mọi phép biến đổi tuyến tính biến đổi một số các vector đặc biệt được gọi là *vector riêng* (từ tiếng Đức *eigen* có nghĩa là 'tự thân') thành các bội của chúng. Nói cách khác, nếu T là một phép biến đổi, e là một vector thì

$$T(e) = \lambda e \qquad (80)$$

trong đó λ là một số vô hướng và vector e được gọi là một *vector riêng* của T và λ là *trị riêng* liên kết. Tập hợp tất cả các trị riêng của một phép biến đổi T được gọi là *phổ* của T.

với độ chính xác khá cao. Các hệ thông thường này không làm ta bối rối. Ta vô tình giả sử rằng kết quả ngẫu nhiên bắt nguồn từ sự thay đổi nhỏ nhưng không kiểm soát được của các điều kiện ban đầu hay của môi trường mỗi lần thí nghiệm được lặp lại.*

Nhưng hệ vi mô thì hình như lại khác. Hai tính chất của các phép đo lượng tử mà ta vừa đề cập biểu thị những điều mà các nhà vật lý quan sát thấy trong mỗi thí nghiệm, mặc dù các điều kiện ban đầu được xem như *giống nhau* trong mọi trường hợp. Nhưng như vậy thì tại sao vị trí của một electron đơn lẻ, hay nhiều biến động lực của các hệ lượng tử lại không tiên đoán được? Nói cách khác, điều gì xảy ra trong khi hàm sóng suy sụp? Sự suy sụp xảy ra trong bao lâu? Trong những ngày đầu của Thuyết lượng tử, cũng có ý kiến cho rằng tính không tiên đoán được là do ta thiếu thông tin về trạng thái của hạt. Điều này dẫn tới nhiều cuộc tìm kiếm các 'biến ẩn'. Tuy vậy mọi nỗ lực đều dẫn tới thất bại. Phải mất nhiều thời gian để cộng đồng khoa học nhận ra rằng tính không tiên đoán được *không* phải do thiếu thông tin về trạng thái của hạt - thực ra đã được mô tả *đầy đủ* bằng một vector trạng thái ψ.

Để làm rõ nguồn gốc của xác suất, ta hãy nhắc lại bản chất của một phép đo, hay đúng hơn, của một quan sát tổng quát.

▷ Một quan sát bất kỳ là sự tạo ra một mẫu tin.

Mẫu tin có thể là một bản ghi nhớ hình ảnh hay âm thanh trong não của chúng ta, hay một bản ghi nhớ bằng chữ viết trên giấy, hay một băng ghi âm, hay một vật đại loại như vậy. Như ta đã giải thích trong quyển trước, một vật là một mẫu tin nếu nó không thể sinh ra hay mất đi một cách ngẫu nhiên. Để tránh sự ngẫu nhiên làm ảnh hưởng, mọi mẫu tin phải được bảo vệ cẩn thận đối với thế giới *bên ngoài*; thí dụ như đặt hồ sơ lưu trữ trong các toà nhà an toàn với động đất, hoả hoạn; giữ hồ sơ trong két sắt, tránh tối đa chấn thương não, v.v...

Quyển III, trang 264

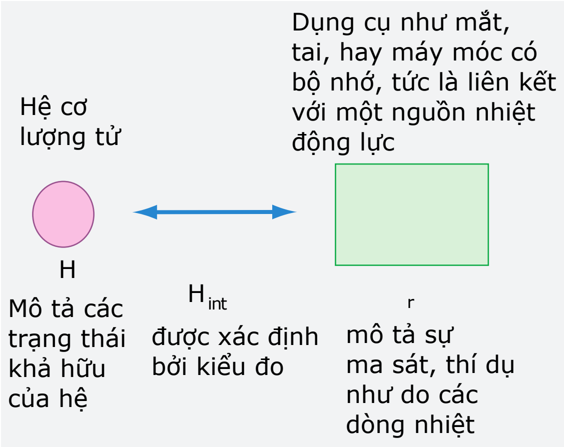
Quan trọng nhất, các mẫu tin phải được bảo vệ trước các thăng giáng *nội bộ*. Những thăng giáng nội bộ này do các thiết bị ghi gồm có nhiều thành phần. Nếu thăng giáng quá lớn, chúng sẽ làm cho ta không phân biệt được các nội dung khả hữu của bộ nhớ. Các thăng giáng giảm đi khi kích thước của hệ gia tăng, điển hình là theo căn bậc 2 của kích thước. Thí dụ, nếu một văn bản viết tay quá nhỏ, ta sẽ khó đọc nó nếu giấy trở nên giòn, dễ vỡ; nếu các dải từ trên băng quá nhỏ, chúng bị khử từ và thông tin đã ghi bị mất. Nói cách khác, một mẫu tin được gia cố để chống lại sự thăng giáng nội bộ bằng cách làm cho nó có kích thước thích hợp. Mỗi mẫu tin bao gồm nhiều thành phần cho thấy sự thăng giáng giảm đi.

Sự quan trọng của kích thước có thể được diễn tả theo cách khác: hệ có bộ nhớ, tức là hệ có khả năng tạo ra một mẫu tin, đều chứa một *nguồn nhiệt động lực*. Tóm lại, mệnh đề: quan sát là sự tạo ra một mẫu tin, có thể được phát biểu một cách chính xác hơn như sau:

▷ Một quan sát bất kỳ của một hệ là kết quả của sự tương tác giữa hệ đó với một nguồn nhiệt động lực trong dụng cụ ghi nhận.

* Để có thể cảm nhận về các giới hạn của các giả sử vô tình này, bạn có thể đọc các câu chuyện về các nhà vật lý đã tạo ra cái máy có thể tiên đoán kết quả của banh roulette từ vận tốc ban đầu mà người hồ lỳ đã truyền cho nó.

Quyển I, trang 128



HÌNH 76 Các khái niệm được sử dụng trong sự mô tả các phép đo.

Ngoài ra, vì các nguồn nhiệt động lực bao hàm sự ma sát, ta cũng có thể nói: bộ nhớ cần sự ma sát. Cũng cần nói thêm, mọi phép đo một đại lượng vật lý đều sử dụng một sự tương tác *phụ thuộc* vào đại lượng đó. Với các nhận xét có vẻ tầm thường này, ta có thể mô tả chi tiết các quá trình quan sát, hay như trong Thuyết lượng tử thường gọi, các quá trình đo.

Một *dụng cụ* đo hay một *máy phát hiện/máy dò*, được đặc trưng bằng 2 phương diện chính, được biểu diễn trong Hình 76: sự tương tác với hệ vi mô và với nguồn nhiệt động lực mà nó chứa đựng để sản xuất ra mẫu tin. Như vậy mô tả một quá trình đo là mô tả sự tiến hoá của hệ vi mô *và* máy phát hiện; do đó người ta cần Hamiltonian của hạt, Hamiltonian tương tác và các tính chất của nguồn nhiệt động lực (như thời gian hồi phục t_r). Tương tác sẽ xác định đại lượng được đo và nguồn nhiệt động lực sẽ thể hiện bộ nhớ.

Xem 120

Ta đã biết rằng chỉ có các hệ nhiệt động lực cổ điển mới có thể không thuận nghịch; các hệ lượng tử thì không như vậy. Do đó ta kết luận: một hệ đo lường *phải* được mô tả theo kiểu cổ điển: nếu khác đi nó sẽ không có bộ nhớ và sẽ không thể là một hệ đo lường: nó không thể sinh ra một mẫu tin! Bộ nhớ là một hiệu ứng cổ điển. (Nói chính xác hơn, bộ nhớ là một tác động chỉ xuất hiện trong giới hạn cổ điển.) Tuy vậy, ta hãy xem điều gì sẽ xảy ra nếu ta mô tả một hệ đo lường theo quan điểm cơ lượng tử.

Ta hãy gọi A là biến động lực được đo trong thí nghiệm và hàm riêng của nó là φ_n. Ta mô tả hệ cơ lượng tử đang quan sát – thường là một hạt – bằng trạng thái ψ. Trạng thái đầy đủ của hệ có thể được viết như sau

$$\psi = \psi_p \, \psi_{\text{other}} = \sum_n c_n \varphi_n \, \psi_{\text{other}} \, . \tag{81}$$

Ở đây, ψ_p là tính chất của trạng thái của (hạt hay hệ) mà ta muốn đo, và ψ_{other} biểu diễn tất cả các bậc tự do khác, tức là những đại lượng không được mô tả – *được sinh*, nói theo ngôn ngữ toán học – bởi toán tử A tương ứng với biến động lực mà ta muốn đo. Các số $c_n = |\varphi_n^\dagger \psi_p|$ cho ta khai triển của trạng thái ψ_p, được chuẩn hoá theo cơ sở φ_n. Thí dụ trong một phép đo vị trí điển hình, các hàm φ_n sẽ là các hàm riêng về vị trí và ψ_{other} sẽ

chứa thông tin về động lượng, spin và các tính chất khác của hạt.

Tương tác hệ–máy đo sẽ thể hiện như thế nào? Ta hãy gọi trạng thái của máy đo trước khi đo là χ_{start}. Máy đo, theo định nghĩa, là thiết bị mà khi nó bị một hạt trong trạng thái $\varphi_n\psi_{\text{other}}$ chạm vào, sẽ thay đổi từ trạng thái χ_{start} sang trạng thái χ_n. Lúc đó ta nói rằng dụng cụ *đã đo* trị riêng a_n tương ứng với hàm riêng φ_n của toán tử A. Chỉ số n là mẫu tin của phép đo; nó được gọi là chỉ số hay biến *con trỏ*. Chỉ số này cho ta biết trạng thái của hệ vi mô trước khi tương tác. Điểm quan trọng, được rút ra từ bàn luận trước đây của chúng ta, là các trạng thái χ_n (các mẫu tin), thì phân biệt về mặt vĩ mô, đúng theo nghĩa của phần trước. Nếu khác đi chúng sẽ không phải là các mẫu tin và sự tương tác với máy đo sẽ không phải là một phép đo.

Dĩ nhiên trong khi đo, dụng cụ nhạy với φ_n sẽ làm thay đổi phần ψ_{other} của trạng thái của hạt thành một số trạng thái $\psi_{\text{other},n}$ khác, tuỳ thuộc vào phép đo và dụng cụ đo; ta không cần nói rõ về nó trong phần bàn luận sau đây.* Nhưng ta hãy kiểm tra thêm cho lý luận của mình. Các dụng cụ đo như đã mô tả có hiện hữu không? Có đấy. Thí dụ như kính ảnh là máy phát hiện vị trí của các hạt ion. Kính ảnh và một cách tổng quát, bất kỳ máy đo vị trí nào đều thực hiện công việc này bằng cách thay đổi động lượng của nó theo một phương thức phụ thuộc vào vị trí được đo: electron chạm vào kính ảnh thì ngừng lại. Trong trường hợp này, χ_{start} là kính ảnh ban đầu, φ_n là hạt định xứ tại điểm n, χ_n là hàm mô tả kính ảnh bị đen ở điểm n và $\psi_{\text{other,n}}$ mô tả động lượng và spin của hạt sau khi nó đã chạm vào kính ảnh ở điểm n.

Bây giờ ta đã sẵn sàng nhìn vào chính quá trình đo. Vào lúc này, ta hãy bỏ qua nguồn nhiệt động lực trong máy đo và chỉ mô tả nó bằng một trạng thái mà ta gọi là χ_{start}. Trước khi tương tác giữa hạt và máy đo, hệ (bao gồm máy đo) ở trong trạng thái đầu ψ_i

$$\psi_i = \psi_p\chi_{\text{start}} = \sum_n c_n\varphi_n\psi_{\text{other}}\chi_{\text{start}} , \tag{84}$$

trong đó ψ_p là trạng thái của (hạt hay hệ). Sau khi tương tác, bằng cách sử dụng các đặc trưng của dụng cụ đo vừa để cập, được biết từ thực nghiệm, ta được trạng thái tổ hợp ψ_a là

$$\psi_a = \sum_n c_n\varphi_n\psi_{\text{other},n}\chi_n . \tag{85}$$

Sự tiến hoá từ ψ_i sang ψ_a suy ra từ phương trình tiến hoá áp dụng cho tổ hợp hạt–máy đo. Trạng thái tổ hợp ψ_a là sự chồng chập của các trạng thái phân biệt vĩ mô của máy đo. Trong thí dụ của chúng ta ψ_a có thể tương ứng với sự chồng chập của trạng thái nơi

---

* Sự tương tác về mặt toán học sẽ thể hiện như thế nào? Từ mô tả mà ta đã có, ta xác định trạng thái cuối đối với từng trạng thái đầu. Vì hai matrix mật độ liên hệ theo công thức

$$\rho_{\text{f}} = T\rho_{\text{i}}T^{\dagger} \tag{82}$$

Câu đố 116 ny

ta có thể suy ra Hamiltonian từ matrix T. Bạn có thể hiểu tại sao không?

Ngoài ra, ta có thể nói một cách tổng quát rằng một dụng cụ đo một biến động lực A có một Hamiltonian tương tác phụ thuộc vào biến con trỏ A, và vì vậy ta có

$$[H + H_{\text{int}}, A] = 0 . \tag{83}$$

một điểm góc trên bên trái của một kính ảnh bị đen với một trạng thái nơi một điểm góc dưới bên phải của kính ảnh khác bị đen. Tình trạng như vậy không bao giờ xảy ra. Ta hãy xem tại sao như vậy.

Matrix mật độ ρ_a của trạng thái tổ hợp ψ_a sau khi đo, được cho bởi công thức

$$\rho_a = \psi_a \otimes \psi_a^\dagger = \sum_{n,m} c_n c_m^* (\varphi_n \psi_{\text{other},n} \chi_n) \otimes (\varphi_m \psi_{\text{other},m} \chi_m)^\dagger , \qquad (86)$$

chứa nhiều số hạng ngoài đường chéo, tức là các số hạng mà $n \neq m$, có trị số khác 0. Bây giờ ta đem nguồn nhiệt động lực trở lại. Từ phần trước ta đã biết tác động của một nguồn nhiệt động lực lên một sự chồng chập vĩ mô như vậy. Ta đã thấy rằng matrix mật độ như ρ_a mất điều hợp cực nhanh. Ở đây ta giả sử là thời gian mất điều hợp nhỏ nên có thể bỏ qua.* Sau khi mất điều hợp, các số hạng ngoài đường chéo bằng 0 và chỉ còn matrix mật độ chéo sau cùng ρ_f, là

$$\rho_\text{f} = \sum_n |c_n|^2 (\varphi_n \psi_{\text{other},n} \chi_n) \otimes (\varphi_n \psi_{\text{other},n} \chi_n)^\dagger \qquad (87)$$

phù hợp với thực nghiệm. Như đã giải thích ở trên, matrix mật độ như vậy mô tả một trạng thái hỗn hợp và các số $P_n = |c_n|^2 = |\varphi_n^\dagger \psi_p|^2$ cho biết xác suất đo được kết quả a_n và xác suất tìm thấy hạt trong trạng thái $\varphi_n \psi_{\text{other,n}}$ cũng như máy đo trong trạng thái χ_n. Nhưng đây đúng là những điều mà hai tính chất của phép đo lượng tử đã nói đến.

Do đó ta thấy rằng qua việc mô tả phép đo như một sự tiến hoá của một hệ lượng tử tương tác với một máy đo vĩ mô có chứa một nguồn nhiệt động lực, ta có thể *suy ra* hai tính chất của các phép đo lượng tử, các số đo khả dĩ và sự suy sụp của hàm sóng, từ phương trình tiến hoá của Cơ học lượng tử. Thời gian mất điều hợp t_d của phần trước trở thành thời gian suy sụp đối với trường hợp của phép đo; thêm nữa ta tìm được

$$t_\text{collapse} = t_\text{d} < t_\text{r} . \qquad (88)$$

Nói cách khác, thời gian suy sụp luôn luôn nhỏ hơn thời gian hồi phục của nguồn nhiệt động lực. Như vậy ta có một công thức cho thời gian để hàm sóng suy sụp. Mọi phép đo thực nghiệm về thời gian suy sụp đã khẳng định kết quả này.

Xem 104

Tại sao xác suất cần $\hbar$?

Trước tiên, ta có thể cho rằng hai tính chất của phép đo lượng tử không chứa $\hbar$ và như vậy không phải là hệ quả của Thuyết lượng tử. Tuy vậy, lý luận này không đúng.

Sự mất điều hợp là một quá trình lượng tử vì $\hbar$ xuất hiện trong biểu thức của thời gian mất điều hợp. Sự suy sụp của hàm sóng dựa trên sự mất điều hợp nên nó cũng là một quá trình lượng tử. Xác suất cũng bắt nguồn từ lượng tử tác dụng.

Thêm nữa, ta đã thấy rằng khái niệm hàm sóng chỉ xuất hiện vì lượng tử tác dụng $\hbar$ khác 0. Hàm sóng, sự suy sụp của chúng và xác suất đều bắt nguồn từ lượng tử tác dụng

Trang 88

* Tuy vậy cần chú ý rằng thời gian mất điều hợp *đúng* bằng 0 sẽ có nghĩa là môi trường hay nguồn nhiệt động lực *thực sự* có vô số bậc tự do, mâu thuẫn với phương trình tiến hoá và đặc biệt mâu thuẫn với tính đơn nguyên, tính định xứ và tính nhân quả. Điều quan trọng trong cả lập luận là không được nhầm lẫn thời gian mất điều hợp rất nhỏ với thời gian mất điều hợp bằng 0.

$\hbar$.

Trang 32 Các kết quả này nhắc lại một phát biểu đã có trước kia: xác suất xuất hiện khi một thí nghiệm nỗ lực phát hiện ra sự thay đổi, tức là giá trị của tác dụng, nhỏ hơn $\hbar$. Nhiều vấn đề về phép đo đã phát sinh từ những nỗ lực như vậy. Tuy vậy, thiên nhiên không cho phép các phép đo như vậy và trong mọi cố gắng làm điều đó đều có xác suất xuất hiện.

Các biến ẩn

Nhiều người không hài lòng với cách giải thích xác suất trong thế giới lượng tử. Họ muốn trong Thuyết lượng tử có nhiều điều huyền bí hơn nữa. Họ không thích suy nghĩ rằng xác suất bắt nguồn từ các nguồn nhiệt động lực và lượng tử tác dụng. Thành kiến nổi tiếng nhất mà họ luôn nuôi dưỡng là cho rằng xác suất bắt nguồn từ các mặt còn ẩn giấu của thiên nhiên mà loài người chưa biết đến. Các tính chất tưởng tượng, chưa biết như vậy được gọi là *các biến ẩn*.

Điều đẹp đẽ nhất của cơ học lượng tử là nó cho phép ta kiểm chứng bằng lý thuyết hay thực nghiệm về sự hiện hữu của các biến ẩn như vậy – mà không cần biết đến chúng. Dĩ nhiên là các biến ẩn kiểm soát sự tiến hoá của hệ vi mô sẽ mâu thuẫn với phát biểu cho rằng ta không thể phát hiện ra các tác dụng nhỏ hơn $\hbar$. Tác dụng nhỏ nhất có thể quan sát được là lý do giải thích cho hành trạng ngẫu nhiên của hệ vi mô. Như vậy tác dụng nhỏ nhất *loại trừ* các biến ẩn. Nhưng ta hãy bàn luận chi tiết hơn một chút.

Trước tiên về mặt lịch sử, có những lập luận trừu tượng chống lại các biến ẩn do John von Neumann đưa ra.* Một định lý no-go (không xảy ra) bổ sung về các biến ẩn đã được Kochen và Specker công bố năm 1967 độc lập với John Bell năm 1969. Định lý này phát biểu: Xem 121

▷ Không thể có các biến ẩn phi ngữ cảnh nếu không gian Hilbert có số chiều bằng hay lớn hơn 3.

Định lý này đề cập đến các biến *phi ngữ cảnh* tức là các biến ẩn *bên trong* hệ cơ lượng tử. Định lý Kochen–Specker phát biểu rằng không có mô hình biến ẩn phi ngữ cảnh vì toán học cấm điều này. Kết quả này về bản chất đã khử mọi khả năng có biến ẩn vì các hệ cơ lượng tử thông thường có chiều của không gian Hilbert lớn hơn 3.

Ta phải lưu ý rằng không có các định lý ràng buộc về các biến ẩn *theo ngữ cảnh* tức là các biến trong môi trường và đặc biệt trong các nguồn nhiệt động lực chứa trong nó. Thật vậy, tính cần thiết của chúng đã được chứng minh ở trên!

Nhận thức thông thường cũng loại bỏ được các biến ẩn bằng một lý luận đơn giản chứ không cần cầu viện đến toán học. Nếu một hệ cơ lượng tử có biến ẩn bên trong, dụng cụ đo sẽ có hàng zillion biến như vậy.** Và điều này có nghĩa là nó không thể hoạt động như một hệ đo lường.

* János Neumann (b. 1903 Budapest, d. 1957 Washington DC) toán gia có uy tín. Một trong những nhà khoa học vĩ đại và lịch lãm nhất trong thế kỷ 20, ông đã giải quyết nhiều vấn đề, đặc biệt trong toán học ứng dụng và Thuyết lượng tử, mà những người khác vẫn còn chống lại cho tới bây giờ. Ông đã nghiên cứu về bom nguyên tử và bom hydrogen, phi đạn và các bài toán phòng thủ tổng quát. Về việc nghiên cứu bom, ông có nhiều ảnh hưởng trong việc xây dựng các máy tính điện tử xưa nhất và mở rộng ý tưởng của Konrad Zuse. Lúc cuối đời, ông muốn thay đổi thời tiết bằng bom hạt nhân. Ông mất vì ung thư do làm việc quá nhiều với bức xạ hạt nhân khi theo dõi các cuộc thử bom.

** 1 zillion bằng 10^{23}.

Dù có nhiều bàn cãi, các nhà nghiên cứu cũng luôn luôn tìm kiếm cách kiểm tra thực nghiệm về các biến ẩn. Nhiều thí nghiệm kiểm tra dựa trên *bất đẳng thức nổi tiếng của Bell*, một hệ thức đơn giản và đẹp đẽ do John Bell* công bố trong những năm 1960s.

Ta có thể phân biệt Thuyết lượng tử và Thuyết hiện thực định xứ sử dụng các biến ẩn không? Tư tưởng ban đầu của Bell là thực hiện điều đó bằng cách đo độ phân cực của hai photon có tương quan. Thuyết lượng tử cho rằng độ phân cực của các photon chỉ cố định lúc nó được đo, trong khi mô hình hiện thực định xứ – mô hình kiểu biến ẩn rõ ràng nhất – cho rằng độ phân cực đã cố định trước đó bằng một biến ẩn. Như Bell đã tìm ra, các thí nghiệm có thể được sử dụng để quyết định ý tưởng nào đúng.

Hãy tưởng tượng rằng độ phân cực được đo tại hai điểm xa nhau A và B. Mỗi quan sát viên có thể đo được 1 hay −1 theo hướng anh ta ưa thích. Ta để cho mỗi quan sát viên chọn hai hướng, 1 và 2, và gọi các kết quả là a_1, a_2, b_1 và b_2. Vì mọi kết quả đo đều là 1 hay −1, giá trị của biểu thức $(a_1 + a_2)b_1 + (a_2 - a_1)b_2$ luôn luôn có giá trị ±2.

Xem 122

Hãy tưởng tượng bạn lặp lại thí nghiệm nhiều lần và giả sử các biến ẩn xuất hiện có tính chất thống kê. Lúc đó bạn có thể suy ra (một trường hợp đặc biệt của) bất đẳng thức Bell đối với *các biến ẩn*; nó sẽ là

Câu đố 117 e

$$|(a_1b_1) + (a_2b_1) + (a_2b_2) - (a_1b_2)| \leqslant 2 . \tag{89}$$

Ở đây, các biểu thức trong ngoặc là trung bình của tích các số đo tính trên một số lớn các mẫu đo. Biểu thức biến ẩn này đúng, độc lập với hướng của các kính phân cực có liên quan.

Mặt khác, đối với trường hợp kính phân cực 1 và 2 ở vị trí A và kính ở vị trí B được chọn với góc π/4, *Thuyết lượng tử* tiên đoán rằng

$$|(a_1b_1) + (a_2b_1) + (a_2b_2) - (a_1b_2)| = 2\sqrt{2} > 2 . \tag{90}$$

Điều tiên đoán hoàn toàn mâu thuẫn với tiên đoán của biến ẩn.

Mọi kiểm chứng thực nghiệm của bất đẳng thức Bell đã khẳng định cơ học lượng tử là chuẩn và chứng tỏ quan niệm biến ẩn là sai. Không có ngoại lệ.

Mọi mâu thuẫn có thể đo được khác, giữa Thuyết lượng tử và thuyết hiện thực định xứ, đã được Greenberger, Horn và Zeilinger tiên đoán trong hệ có 3 hạt liên đới. Một lần nữa, Thuyết lượng tử đã được khẳng định trong nhiều thí nghiệm.

Xem 123

Tóm lại, *không có biến ẩn*. Dĩ nhiên điều này không làm ta ngạc nhiên. Sự tìm kiếm các biến ẩn dựa trên sự hiểu lầm về cơ học lượng tử hay dựa trên sự mong muốn cá nhân về cách thế giới thể hiện, thay vì nhìn nhận thế giới như chính nó thể hiện: có một tác dụng có thể đo được nhỏ nhất, $\hbar$, trong thiên nhiên.

* John Stewart Bell (1928–1990), nhà vật lý lý thuyết nghiên cứu chủ yếu về các nền tảng của Thuyết lượng tử.

Tóm tắt về xác suất và tất định luận

> Geometrica demonstramus quia facimus; si physica demonstrare possemus, faceremus.
>
> Giambattista Vico*

Ta rút ra được nhiều kết luận cần cho phần còn lại của hành trình lên đỉnh. Nên nhớ rằng những kết luận này, mặc dù phù hợp với mọi thí nghiệm vẫn chưa được tất cả các nhà vật lý chia sẻ! Cả chủ đề là một bài toán dành cho những người thích lý thuyết lẫn thực tế.

Trong đời sống hằng ngày, xác suất thường không xuất hiện hay được người ta để ý đến. Thuyết lượng tử chứng tỏ rằng:

- ▷ Xác suất xuất hiện khi một quá trình cố gắng phân biệt giữa các trạng thái khác nhau khoảng một lượng tử tác dụng $\hbar$.
- ▷ Cơ chế chính xác của sự xuất hiện xác suất bắt nguồn từ các nguồn nhiệt động lực có liên quan.

Tóm lại: xác suất xuất hiện khi một thí nghiệm cố gắng phân biệt giữa *các trạng thái gần nhau*. Nói chi tiết hơn:

— Xác suất không xuất hiện trong các phép đo vì trạng thái của hệ lượng tử chưa được biết hay còn mờ nhưng cũng vì ta chưa biết trạng thái chi tiết của một nguồn nhiệt động lực tương tác trong môi trường. Xác suất cơ lượng tử có nguồn gốc thống kê và bắt nguồn từ các nguồn nhiệt động lực trong môi trường hay trong dụng cụ đo, kết hợp với lượng tử tương tác $\hbar$. Xác suất còn do số bậc tự do rất lớn chứa trong nguồn nhiệt động lực. Các con số lớn này làm cho kết quả của các thí nghiệm – đặc biệt là các thí nghiệm có các kết quả khả hữu khác nhau khoảng $\hbar$ – không thể tiên đoán được. Nếu trạng thái của nguồn nhiệt động lực liên quan được biết, ta có thể tiên đoán được kết quả thí nghiệm. Xác suất của Thuyết lượng tử bắt nguồn từ lượng tử tác dụng và 'nhiệt động lực'.

Nói cách khác, *không có xác suất cơ bản* trong thiên nhiên. Mọi xác suất trong thiên nhiên đều do sự mất điều hợp; đặc biệt, mọi xác suất đều có nguồn gốc thống kê đa hạt – một số còn có thể ảo – đó là phần của nguồn nhiệt động lực trong môi trường. Sửa đổi các ngôn từ nổi tiếng của Albert Einstein, ta có thể đồng ý về điều này: 'thiên nhiên không chơi trò xúc xắc.' Do đó ta gọi ψ là *hàm sóng* – thay vì 'biên độ xác suất', như đã thường làm. Một thuật ngữ còn tốt hơn nữa là *hàm trạng thái.*

— Mỗi quan sát trong đời sống hằng ngày là một trường hợp đặc biệt của sự mất điều hợp. Điều mà ta thường gọi là 'sự suy sụp của hàm sóng' là một quá trình mất điều hợp do sự tương tác với các nguồn nhiệt động lực có trong môi trường hay trong dụng cụ đo. Vì con người là loài máu nóng và có trí nhớ nên bản thân họ đã là các dụng cụ đo. Việc thân nhiệt của chúng ta là 37°C giải thích cho việc ta chỉ thấy một thế giới đơn lẻ, không có sự chồng chập nào cả. (Thật ra có nhiều lý do khác; bạn có thể gọi tên một vài lý do không?)

Câu đố 118 s

* 'Ta có thể chứng minh các vật hình học vì ta đã tạo ra chúng; nếu ta có thể chứng minh các vật thật/vật lý thì ta sẽ có thể tạo ra chúng.' Giovanni Battista Vico (b. 1668 Napoli, d. 1744 Napoli) triết gia và tư tưởng gia quan trọng. Trong phát biểu nổi tiếng này ông đã chỉ ra sự khác biệt cơ bản giữa toán học và vật lý.

— Phép đo hoàn tất khi hệ vi mô đã tương tác với nguồn nhiệt động lực trong dụng cụ đo. Thuyết lượng tử là sự mô tả thiên nhiên không cần máy đo; phương trình tiến hoá mô tả mọi loại chuyển động. Tuy vậy, *các phép đo* đòi hỏi có máy đo. Một máy đo, hay máy phát hiện, là một cái máy ghi lại các quan sát. Do đó, nó phải bao gồm một nguồn nhiệt động lực, hay phải là một vật vĩ mô cổ điển. Trong ngữ nghĩa này ta cũng đang nói về một *dụng cụ cổ điển*. Điều đòi hỏi máy đo phải là cổ điển đã được nhấn mạnh trong quá trình phát triển từ xa xưa của Thuyết lượng tử.
— Mọi phép đo, các quá trình mất điều hợp liên quan tới sự tương tác với các nguồn nhiệt động lực, là các quá trình không thể đảo ngược và làm tăng entropy.
— Mỗi phép đo, giống như thí dụ về sự mất điều hợp, là một trường hợp đặc biệt của sự tiến hoá cơ lượng tử, cụ thể là sự tiến hoá đối với tổ hợp của hệ lượng tử, máy đo vĩ mô và một nguồn nhiệt động lực. Vì phương trình tiến hoá là một bất biến tương đối tính nên không có vấn đề nhân quả cũng như vấn đề định xứ hay vấn đề hợp lý xuất hiện trong phép đo.
— Vì cả phương trình tiến hoá lẫn quá trình đo đều không liên quan đến các đại lượng nào khác hơn không–thời gian, Hamiltonian, các nguồn nhiệt động lực và các hàm sóng nên không có đại lượng nào khác đóng vai trò quan trọng trong phép đo. Đặc biệt, không có quan sát viên cũng như không cần đến ý thức. Mỗi phép đo được xem là hoàn tất khi hệ vi mô đã tương tác với nguồn nhiệt động trong dụng cụ đo. Sự mất điều hợp gắn liền với mỗi phép đo đã xảy ra mặc dù không có người quan sát. Hệ quả tầm thường này phù hợp với các quan sát trong đời sống hằng ngày, thí dụ như Mặt trăng chuyển động quanh Trái đất cho dù không có ai quan sát.* Tương tự như vậy, một thân cây ngã xuống giữa rừng tạo ra tiếng động cho dù không ai lắng nghe. Sự mất điều hợp độc lập với sự quan sát, trí tuệ và sự hiện hữu của con người.

Quyển III, trang 338

— Trong mỗi phép đo, hệ lượng tử tương tác với máy đo. Vì có giá trị cực tiểu cho độ lớn của tác dụng, mỗi *quan sát đều ảnh hưởng tới vật được quan sát.* Do đó mỗi phép đo đều *làm nhiễu loạn* hệ lượng tử. Một mô tả chính xác các quan sát cũng phải bao gồm sự mô tả nhiễu loạn này. Trong phần này, nhiễu loạn được mô hình bằng sự thay đổi trạng thái của hệ từ ψ_{other} sang $\psi_{\text{other},n}$. Nếu không có sự thay đổi trạng thái và sự nhiễu loạn của hệ lượng tử như vậy thì không thể có phép đo.
— Vì một quá trình đo hoàn tất được mô tả bằng Cơ học lượng tử, tính đơn nguyên đang và vẫn còn là tính chất cơ bản của sự tiến hoá. Không có các quá trình không đơn nguyên trong Cơ học lượng tử.
— Việc mô tả sự suy sụp của hàm sóng như một quá trình mất điều hợp là cách giải thích chính xác với ý nghĩa thuật ngữ 'giải thích' phải được xác định trước; nó mô tả mối liên hệ giữa sự quan sát và mọi phương diện khác của thực tại, trong trường hợp này là nguồn nhiệt động lực ở trong máy đo hay trong môi trường. Người ta đã đo, tính toán và *giải thích* sự suy sụp của hàm sóng. Sự suy sụp không phải là một vấn đề về 'cách hiểu', hay quan điểm, như người ta thường nghĩ.**

Quyển III, trang 333

— Việc suy đoán xem sự tiến hoá đối với một phép đo lượng tử *đơn lẻ*, nếu ta biết trạng thái của môi trường chung quanh hệ, có thể xác định được hay không là một điều vô

* Quan điểm ngược lại nhiều khi được gán nhầm cho Niels Bohr. Dĩ nhiên Mặt trăng tiếp xúc với nhiều nguồn bức xạ. Bạn có thể kể ra vài nguồn không?

Câu đố 119 s

** Điều này hàm ý rằng cách diễn dịch 'nhiều thế giới' là một cách suy nghĩ đầy tham vọng. Kết luận này đã được khẳng định khi ta nghiên cứu kỹ về cách tiếp cận của tôn giáo. Nó là một hệ thống đức tin, không dựa trên sự kiện.

Xem 124

ích. Phép đo cần các nguồn nhiệt động lực. Nhưng một nguồn nhiệt động lực, với sự gần đúng tuyệt hảo, thì không thuận nghịch và vì vậy ta không thể mô tả nó bằng một hàm sóng, là một đối tượng biến đổi thuận nghịch.*

Tóm lại:

- ▷ Cơ học lượng tử thì tất định.
- ▷ Các nguồn nhiệt động lực mang tính xác suất.
- ▷ Các nguồn nhiệt động lực mang tính xác suất vì lượng tử tác dụng.

Tóm lại, *không có* điều không hợp lý trong Thuyết lượng tử. Bất cứ ai sử dụng Thuyết lượng tử để làm luận cứ cho sự mê tín, các hành xử không hợp lý, đức tin hay ý thức hệ tân kỳ đều bị lên án vì đã phổ biến thông tin sai lạc. Phát biểu của Gell-Mann ở đầu chương này là một thí dụ. Dưới đây là một phát biểu nổi tiếng nhưng sai lầm của Richard Feynman:

Trang 144

> ... không ai hiểu cơ học lượng tử.

Xem 125

Dĩ nhiên là giải Nobel không tránh khỏi các quan điểm méo mó vì ý thức hệ. Phát biểu đúng phải là:

- ▷ Lượng tử tác dụng và sự mất điều hợp là điểm then chốt để ta tìm hiểu Thuyết lượng tử.

Đúng ra $\hbar$ và sự mất điều hợp cho phép ta minh giải nhiều vấn đề khác.

Sự khác nhau giữa không gian và thời gian là gì?

Không gian khác thời gian. Các vật định xứ trong không gian chứ không ở trong thời gian. Tại sao lại như vậy? Trong thiên nhiên, phần lớn các tương tác hệ–nguồn nhiệt động lực có trung gian là một thế. Mọi thế theo định nghĩa đều phụ thuộc vị trí. Do đó, mỗi thế là một hàm theo vị trí $\boldsymbol{x}$, giao hoán với biến động lực vị trí (và cũng với Hamiltonian tương tác). Sự mất điều hợp do nguồn nhiệt động lực gây ra – trừ trường hợp được xử lý đặc biệt – và trước tiên nó phá huỷ các phần tử không nằm trên chéo vì mỗi chồng chập các trạng thái tập trung ở những địa điểm khác nhau. Tóm lại, *vật thể được định xứ vì chúng tương tác với các nguồn nhiệt động lực thông qua các thế.*

Với cùng lý do như vậy, các vật thể chỉ có một hướng trong không gian và tại một thời điểm. Nếu tương tác hệ–nguồn nhiệt động lực phụ thộc vào spin, nguồn nhiệt động lực dẫn tới 'sự định xứ' trong biến spin. Điều này xảy ra cho mọi hệ vi mô tương tác với nam châm. Kết quả là người ta hầu như không bao giờ quan sát được sự chồng chập vĩ mô của sự từ hoá. Vì electron, proton và neutron có moment từ và spin, kết luận này có thể mở rộng ra thành: ta không bao giờ thấy các vật thông thường trong sự chồng chập của

* Kiểu tất định luận cực mạnh này sẽ gặp nhiều thách thức trong phần cuối của quyển sách, ở đó ta sẽ thấy rằng thời gian không phải là một khái niệm cơ bản và do đó cuộc tranh luận về Tất định luận mất đi sự quan tâm của nhiều người.

các trạng thái quay khác nhau vì sự tương tác của chúng với các nguồn nhiệt động lực phụ thuộc vào spin.

Có một phản thí dụ là phần lớn các hệ không định xứ trong thời gian mà hiện hữu trong một thời gian rất dài vì thực tế mọi tương tác hệ–nguồn nhiệt động lực *không* giao hoán với thời gian. Đúng ra đây là cách định nghĩa một nguồn nhiệt động lực. Tóm lại, *vật thể không thay đổi vì chúng tương tác với các nguồn nhiệt động lực.*

Bạn có thể tìm được một tương tác phụ thuộc động lượng thay vì phụ thuộc vị trí không? Hệ quả đối với các hệ vĩ mô là gì?

Câu đố 120 s

Nói cách khác, khác với Thuyết tương đối tổng quát, Thuyết lượng tử tạo ra sự khác biệt giữa không gian và thời gian. Đúng ra ta có thể *xác định* vị trí như một biến động lực giao hoán với Hamiltonian tương tác. Sự khác biệt này của không gian và thời gian bắt nguồn từ các tính chất của vật chất và sự tương tác của chúng. Ta không thể suy diễn ra sự khác biệt này trong Thuyết tương đối tổng quát.

Chúng ta có phải là các nhà quan sát cừ khôi không?

Con người có phải là các máy đo cổ điển không? Vâng, đúng như vậy. Mặc dù nhiều vật lý gia lỗi lạc cho rằng ý chí tự do và xác suất có liên hệ với nhau, việc nghiên cứu kỹ càng cho ta thấy điều này không đúng như vậy. Các giác quan của chúng ta là các máy cổ điển vì chúng tuân theo định nghĩa của chúng: giác quan của người ghi nhận các quan sát bằng cách tương tác với các nguồn nhiệt động lực. Não của chúng ta cũng là một máy đo cổ điển: tế bào thần kinh được nhúng chìm trong các nguồn nhiệt động lực. Xác suất lượng tử *không* đóng một vai trò xác định nào trong não.

Xem 126

Một thực thể quan sát, dù là máy móc hay con người, đều cần một nguồn nhiệt động lực và một bộ nhớ để ghi lại các quan sát. Điều này có nghĩa là các quan sát viên phải được tạo thành từ vật chất; một quan sát viên không thể được tạo ra từ bức xạ. Như vậy sự mô tả thiên nhiên của chúng ta rất thiên vị: ta mô tả nó theo quan điểm vật chất. Điều đó hơi giống việc mô tả các ngôi sao bằng cách đặt Trái đất ở tâm của vũ trụ: ta luôn luôn đặt vật chất ở trung tâm của sự mô tả. Ta có thể loại bỏ Thuyết nhân hình cơ bản này không? Ta sẽ tìm ra câu trả lời ở cuối cuộc hành trình.

Quyển VI, trang 83

Mối liên hệ giữa Lý thuyết thông tin, mật mã học và Thuyết lượng tử là gì?

Vật lý học đồng nghĩa với việc nói về các quan sát thiên nhiên. Giống như các quan sát khác, các phép đo sinh ra thông tin. Như vậy người ta có thể diễn dịch phần lớn (nhưng không phải tất cả) Thuyết lượng tử thành ngôn ngữ của Lý thuyết thông tin. Đặc biệt, sự hiện hữu của độ biến đổi nhỏ nhất trong thiên nhiên hàm ý rằng thông tin về một hệ vật lý không bao giờ đầy đủ, sự truyền tin có giới hạn và ta không bao giờ có thể tin cậy hoàn toàn vào thông tin. Nghiên cứu kỹ càng điều này tạo thành một hướng hấp dẫn để tìm hiểu thế giới vi mô.

Sự tương đồng giữa Thuyết lượng tử và Lý thuyết thông tin trở nên hấp dẫn hơn khi những phát biểu được dịch thành ngôn ngữ của mật mã học. Mật mã học là khoa học về sự truyền các thông điệp bí mật mà chỉ có các máy chuyên dụng mới có thể giải mã được. Trong thời đại của việc theo dõi sát sao, mật mã học là một công cụ quan trọng để

Xem 127

bảo vệ sự tự do cá nhân.*

Lượng tử tác dụng hàm ý rằng các thông điệp có thể được gởi đi bằng một cách (gần như) an toàn. Lắng nghe một thông điệp là một quá trình đo. Vì có tác dụng nhỏ nhất $\hbar$, ta có thể phát hiện có người nào đang cố gắng nghe lén thông điệp mà ta đã gởi đi. Để tránh kiểu tấn công 'người trong cuộc' – người giả vờ là người nhận và gởi một bản sao của thông điệp tới người nhận thật – ta có thể sử dụng các hệ *liên đới* làm tín hiệu hay thông điệp truyền tin. Nếu sự liên đới bị phá huỷ, đã có người nghe lén thông điệp. Thường thường các nhà mật mã học lượng tử sử dụng hệ truyền thông dựa trên các photon liên đới.

Vấn đề chính của *Mật mã học lượng tử*, một lĩnh vực nghiên cứu hiện đại và to lớn, là bài toán phân phối khoá. Mọi truyền thông có bảo mật đều dựa trên một khoá bí mật được sử dụng để mã hoá thông điệp. Mặc dù kênh truyền thông có độ bảo mật cao nhất – giống như các photon liên đới – người ta vẫn phải tìm cách gởi cho người liên lạc với mình khoá bí mật cần dùng để mã hoá các thông điệp. Tìm ra các phương pháp mã hoá như vậy là mục đích chính của của Mật mã học lượng tử. Tuy vậy, việc nghiên cứu kỹ vấn đề chứng tỏ rằng mọi phương pháp trao đổi khoá đều có mặt hạn chế về tính bảo mật.

Tóm lại, bắt nguồn từ lượng tử tác dụng, thiên nhiên đã giới hạn khả năng gởi các thông điệp được mã hoá. Các giới hạn này (gần như) tương đương với giới hạn mà lượng tử tác dụng áp đặt lên sự biến đổi trong thiên nhiên.

Vũ trụ có phải là một máy tính không?

Lượng tử tác dụng đặt ra một giới hạn cho việc trao đổi thông tin có bảo mật. Mối liên hệ này cho phép ta dẹp qua một bên nhiều phát biểu không đúng thường gặp trong truyền thông. Phát biểu 'vũ trụ là thông tin' hay 'vũ trụ là một máy tính' thì cũng hợp lý như phát biểu 'vũ trụ là một phép đo' hay 'một nhà sản xuất chewing-gum'. Một chuyên viên về chuyển động nên biết các mệnh đề đáng ngờ này; người sử dụng chúng hoặc tự đánh lừa mình hoặc cố đánh lừa những người khác.

Quyển VI, trang 109

Vũ trụ có hàm sóng hay không? Các điều kiện ban đầu của nó là gì?

Hàm sóng của vũ trụ thường được viện dẫn trong các cuộc bàn luận về Thuyết lượng tử. Nhiều kết luận khác nhau được suy ra từ ý tưởng này, thí dụ như về tính không thuận nghịch của thời gian, sự quan trọng của các điều kiện ban đầu, những biến đổi cần đến Thuyết lượng tử .v.v... Những lập luận này có đúng không?

Điều đầu tiên cần làm sáng tỏ là ý nghĩa của từ 'vũ trụ'. Như đã giải thích, thuật ngữ này có 2 nghĩa: hoặc là tập hợp của vật chất và bức xạ, hay là tập hợp này *cộng* tất cả không-thời gian. Ta cũng nên nhắc lại ý nghĩa của 'hàm sóng': nó mô tả *trạng thái* của một hệ. Trạng thái dùng để phân biệt 2 hệ đồng nhất (nhưng khác nhau); thí dụ như vị trí và tốc độ phân biệt hai trái bi bằng ngà (giống nhau) trên bàn billiard. Ngoài ra, tương tự như vậy, trạng thái mô tả sự biến đổi theo thời gian.

Quyển II, trang 228

* Mật mã học bao gồm lĩnh vực *công nghệ mã hoá*, nghệ thuật mã hoá thông điệp và lĩnh vực *phân tích mật mã*, nghệ thuật giải mã các thông điệp được mã hoá. Để có các bước nhập môn vững chắc về mật mã học, hãy đọc quyển sách của Albrecht Beutelspacher, Jörg Schwenk & Klaus-Dieter Wolfenstätter, *Moderne Verfahren der Kryptographie*, Vieweg 1995.

Vũ trụ có trạng thái không? Nếu ta lấy nghĩa rộng của vũ trụ thì không phải. Việc nói về trạng thái của vũ trụ là một điều mâu thuẫn: theo định nghĩa, khái niệm trạng thái, được định nghĩa như đặc điểm hay thay đổi của một vật, chỉ có thể áp dụng cho *các phần* của vũ trụ.

Quyển I, trang 27

Lúc đó ta có thể lấy một nghĩa 'vũ trụ' hẹp hơn – tổng của tất cả vật chất cùng bức xạ – và hỏi câu hỏi này một lần nữa. Để xác định trạng thái của tất cả vật chất và bức xạ, ta cần có khả năng đo nó: ta cần một môi trường. Nhưng môi trường của vật chất và bức xạ chỉ là không-thời gian; ta không thể xác định các điều kiện ban đầu vì ta cần các phép đo và một máy đo để làm việc này. Một máy đo là một hệ vật chất gắn với một nguồn nhiệt động lực; tuy nhiên, ngoài vũ trụ không có một hệ như vậy.

Tóm lại, Thuyết lượng tử không cho phép đo vũ trụ.

▷ Vũ trụ không có trạng thái.

Bạn hãy thận trọng với những người tuyên bố là biết mọi điều về hàm sóng của vũ trụ. Bạn chỉ cần hỏi anh ta câu hỏi của Wheeler: Nếu bạn biết hàm sóng của vũ trụ thì tại sao bạn lại không giàu?

Dù đã có kết luận này, nhiều nhà vật lý nổi tiếng đã đề nghị các phương trình tiến hoá cho hàm sóng của vũ trụ. (Nổi tiếng nhất trớ trêu thay lại là phương trình Wheeler–DeWitt.) Điều kỳ cục là không có một tiên đoán nào của các phương trình này phù hợp với thực nghiệm; về mặt nguyên tắc các lập luận đưa ra cũng không phù hợp. Việc tìm hiểu các phương trình như vậy thú vị đến nỗi ngay từ đầu ta phải bỏ qua nếu bạn muốn hoàn tất cuộc thám hiểm và tránh khỏi việc sa đà vào các niềm tin lầm lạc.

Xem 128

Có nhiều điều rắc rối trong câu chuyện này. Một là bản thân không-thời gian, dù không có vật chất, vẫn có thể là một nguồn nhiệt động lực. Điều suy đoán này sẽ được chứng minh là đúng trong phần cuối của cuộc hành trình. Kết quả này hình như cho phép ta nói đến hàm sóng của vũ trụ. Nhưng hoá ra là thời gian *không xác định* ở thang đo nơi không-thời gian thực sự là một nguồn nhiệt động lực; điều này hàm ý rằng khái niệm trạng thái không áp dụng được ở đây.

Vũ trụ không có 'trạng thái' là một khẳng định mạnh mẽ. Nó cũng hàm ý rằng không có điều kiện ban đầu! Các lập luận cũng tương tự. Đây là một kết quả khó chấp nhận. Ta đã quá quen thuộc với ý tưởng vũ trụ có điều kiện ban đầu đến nỗi ta không bao giờ thắc mắc về điều đó. (Mặc dù trong sách này có thể có sai lầm ở đâu đó.) Nhưng vũ trụ không có điều kiện ban đầu.

Tóm lại ta có thể ghi nhớ điều này ngay cả khi ta có xét đến các kết quả nghiên cứu mới nhất hay không: Vũ trụ *không* phải là một hệ, *không có* hàm sóng và *không có* điều kiện ban đầu – độc lập với ý nghĩa của từ 'vũ trụ'.

Chương 8

Màu sắc và sự tương tác giữa ánh sáng và vật chất

> “Rem tene; verba sequentur.**”
>
> Cato

Các viên đá và mọi vật đều có màu sắc. Tại sao? Nói cách khác, cách mà các hạt lượng tử tích điện, được tìm thấy trong đá và các vật khác, tương tác với điện từ trường như thế nào? Trong chương này, đầu tiên ta sẽ đưa ra một tổng quan về các phương thức để màu sắc trong thiên nhiên được sinh ra từ lượng tử tác dụng, tức là từ sự tương tác giữa các quanton vật chất và photon. Kế đến ta sẽ tìm hiểu một hệ đơn giản nhất: ta sẽ trình bày phương thức mà lượng tử tác dụng đã làm cho các nguyên tử hydrogen tạo ra các màu sắc khác nhau. Sau đó ta sẽ tiếp tục tìm hiểu sự tương tác giữa vật chất và bức xạ dẫn tới các hiệu ứng khác nhau, đặc biệc là khi ta tính đến Thuyết tương đối hẹp.

Các nguyên nhân gây ra màu sắc

Thuyết lượng tử giải thích được sự phát sinh mọi màu sắc trong thiên nhiên. Thật vậy, màu sắc mà ta quan sát được bắt nguồn từ các hạt *tích điện*. Nói chính xác hơn, màu sắc bắt nguồn từ sự tương tác của các điện tích với photon. Mọi màu sắc đều là các hiệu ứng lượng tử.

Từ trước tới giờ, ta đã tìm hiểu chuyển động của các quanton chỉ được mô tả bằng khối lượng. Bây giờ ta nghiên cứu chuyển động của các hạt tích điện. Các điện tích làm nền tảng cho màu sắc thường là electron và hạt nhân, bao gồm các phần cấu tạo của chúng, từ ion, nguyên tử, phân tử tới chất lỏng và chất rắn. Nhiều vấn đề về màu sắc vẫn còn là chủ đề nghiên cứu. Thí dụ như đến gần đây người ta vẫn chưa biết rõ tại sao nhựa đường có màu đen, cấu trúc chính xác của các hợp chất hoá học, *asphaltenes*, cách tạo ra màu nâu đậm. Chỉ có các nghiên cứu mới đây mới giải quyết được vấn đề này. Đúng ra sự phát triển của thuốc nhuộm mới, và các hiệu ứng màu mới, là phần quan trọng của công nghiệp hiện đại.

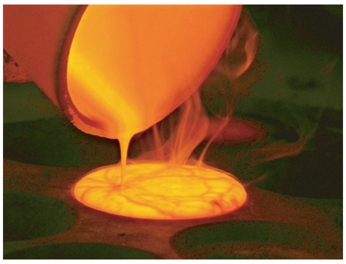
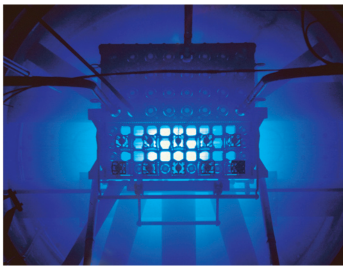
Xem 130

Một tổng quan về các cơ chế đặc biệt phát sinh màu sắc được liệt kê trong bảng dưới đây. Bảng này bao gồm mọi màu sắc xuất hiện trong đời sống hằng ngày. (Bạn có thể tìm ra xem có màu nào bị thiếu không?)

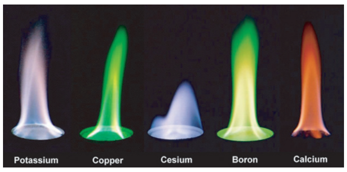
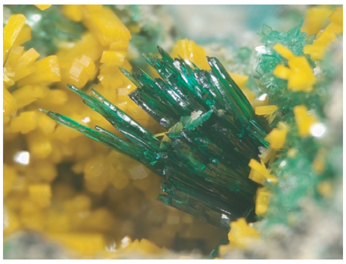
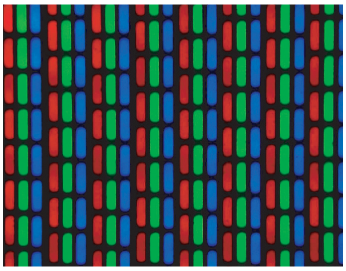
Xem 129
Câu đố 121 s

** ‘Hãy nắm vững chủ đề rồi từ ngữ sẽ nảy sinh.’ Marcus Porcius Cato, (234–149 BCE) hay Cato the elder, chính trị gia La Mã nổi tiếng về tài hùng biện và sự cương trực.

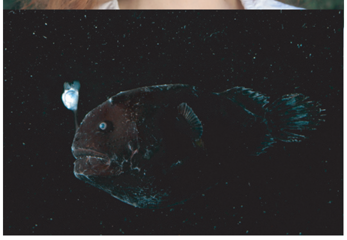
BẢNG 7 Các nguyên nhân gây ra màu sắc.

Loại	Thí dụ	Chi tiết
Loại I: Màu sắc bắt nguồn từ sự kích thích đơn giản		
	1. Sự nóng sáng và sự phát xạ của các điện tích tự do	
	Hồ quang carbon, thép nóng, tim đèn tròn, phần lớn các ngôi sao, magma, dung nham, kim loại nóng chảy	Màu sắc bắt nguồn từ quang phổ liên tục do vật chất nóng phát xạ; dãy màu sắc, theo định luật Wien, là đen, đỏ, cam, vàng, trắng, trắng xanh (chì và bạc nóng chảy © Graela)
	ngọn lửa của gỗ và nến	Ngọn lửa của gỗ và sáp có màu vàng bắt nguồn từ sự nóng sáng do dư carbon và thiếu oxygen
	Pháo hoa màu trắng, đèn flash, pháo nhang	Do kim loại bị đốt thành oxide ở nhiệt độ cao, như magnesium, kẽm, sắt, nhôm hay zirconium (pháo nhang © Sarah Domingos)
	Các lò phản ứng hạt nhân, nguồn sáng synchrotron, laser electron tự do	Do các điện tích tự do chuyển động nhanh: Bức xạ Vavilov–Čerenkov bắt nguồn từ việc tốc độ của hạt lớn hơn tốc độ ánh sáng trong môi trường vật chất, Bremsstrahlung bắt nguồn từ sự giảm tốc của các điện tích (lõi của lò phản ứng hạt nhân ở dưới nước, courtesy NASA)
	2. Sự kích thích của nguyên tử khí	
	đèn neon màu đỏ, đèn argon màu xanh, đèn thuỷ ngân tử ngoại, đèn đường Natrium màu vàng, phần lớn các laser khí, laser hơi kim loại, một số chất huỳnh quang	Màu sắc bắt nguồn từ sự chuyển dời giữa các mức năng lượng nguyên tử (sự phóng điện trong chất khí © Pslawinski)
	Cực quang, sự phát quang do ma sát trong băng nhựa, tinh thể phát quang trong bromat strontium	Trong không khí, các màu xanh, đỏ bắt nguồn từ các mức năng lượng nguyên tử, phân tử của nitrogen, còn màu lục, vàng, cam là của oxygen (cực quang © Jan Curtis)

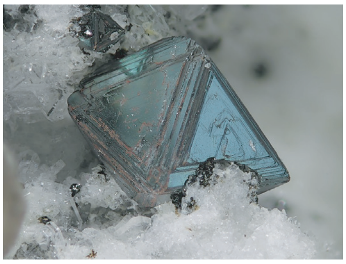
BẢNG 7 Các nguyên nhân gây ra màu sắc (tiếp theo).

Loại	Thí dụ	Chi tiết
	Tia sét, hồ quang, tia lửa điện, pháo hoa màu, phần lớn các ngọn lửa có màu, một số chất điện phát quang	Các vạch màu bắt nguồn từ các mức năng lượng của các nguyên tử bị kích thích mạnh (các ngọn lửa của K, Cu, Cs, B, Ca © Philip Evans)
	3. Dao động và chuyển động quay của các phân tử	
	Nước xanh, nước đá xanh khi trong sạch, iod tím, brom nâu đỏ, chlor lục vàng, ngọn lửa đỏ của CN hay xanh lục của CH, một số laser khí, màu xanh ozone dẫn tới màu xanh xám của trời chiều	Màu sắc bắt nguồn từ các mức năng lượng quay và dao động trong phân tử (băng sơn màu xanh © Marc Shandro)
Loại II: Màu sắc bắt nguồn từ các hiệu ứng trường ligand		
	4. Các hợp chất kim loại chuyển tiếp	
 	Malachite $Cu_2CO_3(OH)_2$ xanh lục, oxid cobalt xanh, azurite $Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$ xanh, hematite Fe_2O_3 từ đỏ tới nâu, MnO xanh lục, $Mn(OH)_2$ trắng, manganite nâu, màu lục của chrome Cr_2O_3, praesodymium xanh lục, europium hồng và hợp chất samarium vàng, $Cr_2O_3 - Al_2O_3$ đổi màu do nhiệt độ và áp suất; phosphor phát quang do electron và tia tử ngoại, chỉ báo nhấp nháy, một số chất huỳnh quang, một số laser	Màu sắc bắt nguồn từ các trạng thái điện tử của ion; chất lân quang được sử dụng trong ống tia cathode của màn hình TV/máy tính và trên đèn ống huỳnh quang (malachite xanh lục trên kasolite vàng, một khoáng chất có uranium, chiều rộng ảnh 5 mm, tìm thấy ở Kolwezi, Zaire/Congo, © Stephan Wolfsried, ảnh của mặt nạ màn hình television © Planemad)
	5. Tạp chất của kim loại chuyển tiếp	
	Ruby, emerald, alexandrite, perovskites, các loại laser tương ứng	Trạng thái điện tử của các ion kim loại chuyển tiếp bị ánh sáng kích thích và hấp thu các bước sóng đặc biệt (ruby trên calcite lấy từ Mogok, Myanmar, chiều rộng ảnh 3 cm, © Rob Lavinsky)

BẢNG 7 Các nguyên nhân gây ra màu sắc (tiếp theo).

Loại	Thí dụ	Chi tiết
Loại III: Màu sắc bắt nguồn từ vân đạo phân tử		
   	**6. Các hợp chất hữu cơ** Haemoglobin đỏ trong máu, haemocyanin màu xanh trong máu, chlorophyll xanh lục trong thực vật, carotene vàng cam trong carrot, hoa và lá thu vàng, anthocyanins đỏ tím trong dâu rừng, hoa và lá thu đỏ, màu chàm, lycopene đỏ trong cà chua, thịt đỏ do myoglobin chứa sắt, glucosamine nâu trong vụn thức ăn nướng, tannin nâu, eumelanin đen trong da, tóc và mắt, pheomelanin giàu chất sắt trong tóc màu hung, melanin đen trong táo và chuối đã cắt ra cũng như trong vẩy của tắc kè, nhựa đường nâu đen, một số chất huỳnh quang, chất hoá phát quang, chất lân quang, hiện tượng đổi màu do pH, do điện và do nhiệt, laser phẩm nhuộm	Màu sắc bắt nguồn từ các liên kết π liên hợp, tức là các liên kết đơn và đôi hoán đổi trong các phân tử; các sắc tố của hoa phần lớn là anthocyanins, betalains hay carotenes; được sử dụng trong phẩm màu dành cho thực phẩm và mỹ phẩm, trong thuốc nhuộm vải, trong màn hình đổi màu do điện, trong mực của máy in màu, các chất nhạy sáng (hoa thuỷ tiên © Thomas Lüthi, giọt máu trên ngón tay © Ian Humes, dâu rừng © Nathan Wall, tóc, dusdin)
	Đom đóm, một số vi khuẩn và nấm, nhiều loài cá ở biển sâu, bạch tuộc, sứa và các loài vật ở biển sâu khác	Hiện tượng sinh phát quang bắt nguồn từ các phân tử bị kích thích, thường được gọi là *luciferines* (cá cần câu, dài 4.5 cm, © Steve Haddock)

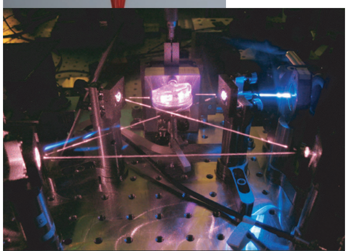
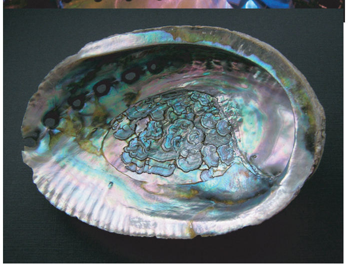
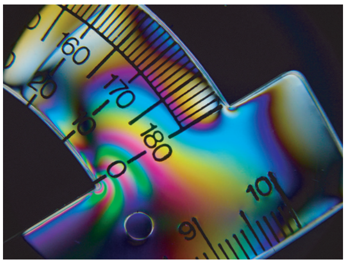
BẢNG 7 Các nguyên nhân gây ra màu sắc (tiếp theo).

Loại	Thí dụ	Chi tiết
 	**7. Truyền điện tích vô cơ**	
	Sapphire xanh, lapis lazuli xanh, amazonite lục, magnetite Fe_3O_4 nâu đen và nhiều khoáng chất sắt khác (basalt đen, màu nâu của chai bia, cát vàng và nhiều loại đá khác có sắc nâu hay đỏ), graphite đen, permanganate tím, potassium dichromate cam, molybdates vàng, hematite Fe_2O_3 đỏ, một số chất huỳnh quang	Ánh sáng cảm ứng do sự thay đổi vị trí của một electron từ nguyên tử này sang nguyên tử khác; thí dụ như trong sapphire xanh là sự chuyển dời giữa tạp chất Ti và Fe; nhiều bột màu sơn có màu do sự truyền điện tích; thuốc thử huỳnh quang được sử dụng trong y học và sinh học phân tử (magnetite tìm thấy ở Laach, Germany, chiều rộng ảnh 10 mm, © Stephan Wolfsried, sa mạc Evelien Willemsen)
Loại IV: Màu sắc bắt nguồn từ hiệu ứng vùng năng lượng		
	**8. Vùng năng lượng trong kim loại**	
	Vàng (xanh lục trong ánh sáng truyền qua), pyrite, sắt, đồng thau, hợp kim, bạc, đồng, thuỷ tinh ruby	Màu sắc trong ánh sáng phản xạ và truyền qua bắt nguồn từ sự chuyển mức của electron giữa các vùng năng lượng chồng lên nhau (saxophone © Selmer)
	**9. Vùng năng lượng của chất bán dẫn thuần**	
	Silicon, GaAs, galena PbS đen, cinnabar HgS đỏ, màu vàng cadmium CdS, CdSe đen, CdS_xSe_{1-x} đỏ, ZnO trắng, vermillion HgS cam, kim cương không màu, SmS có màu thay đổi theo áp suất từ đen tới vàng	Màu sắc bắt nguồn từ sự chuyển mức của electron giữa các vùng năng lượng tách biệt; dãy màu là đen, đỏ, cam, vàng, trắng/không màu; một số được sử dụng như bột màu (oxide kẽm, Walkerma)
	**10. Vùng năng lượng của chất bán dẫn có tạp chất**	

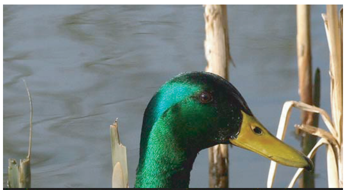
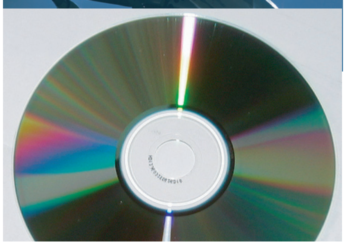
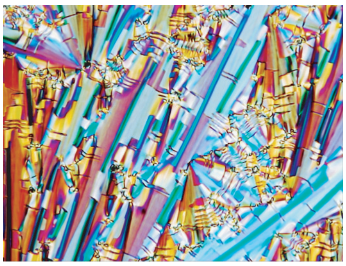
BẢNG 7 Các nguyên nhân gây ra màu sắc (tiếp theo).

Loại	Thí dụ	Chi tiết
	Kim cương xanh, vàng, lục và đen; LED; laser bán dẫn; pin mặt trời; ZnS và $Zn_xCd_{1-x}S$ và các chất lân quang khác	Màu sắc bắt nguồn từ sự chuyển mức giữa các vùng tạp chất và vùng dẫn (thí dụ kim cương xanh: accepter là Bor, kim cương đen: donor là nitrogen) (các chấm lượng tử © Andrey Rogach)
	11. Các tâm màu	
	Amethyst, thạch anh màu khói, fluorite, kim cương lục, topaz xanh, vàng, nâu, muối nâu, màu tím của ly có chứa Mn^{2+} được chiếu xạ, phát quang do hoà tan, một số chất huỳnh quang, laser tâm màu	Màu sắc bắt nguồn từ các tâm màu, tức là electron hay lỗ trống trong tinh thể; các tâm màu thường được tạo ra bằng bức xạ (amethyst © Rob Lavinsky)
	Một số kính đổi màu	Sự đổi màu do ánh sáng bắt nguồn từ các tâm màu được tạo ra bằng tia tử ngoại trong ánh sáng Mặt trời
Loại V: Màu sắc bắt nguồn từ quang vật lý và quang hình		
	12. Sự nhiễu xạ tán sắc và sự phân cực	
	Kim cương và zirconia đã cắt, quầng và nhật cầu được tạo ra bởi các tinh thể nước đá trong không khí	Sự phân tích thành quang phổ (tia lửa hay 'lửa' của đá quý) bắt nguồn từ sự tán sắc trong các tinh thể (ảnh zirconia © Gregory Phillips)
	Cầu vồng	Màu sắc của cầu vồng sơ cấp và thứ cấp bắt nguồn từ sự tán sắc trong các giọt nước nhỏ
	Tia chớp lục	sự đổi màu mặt trời do sự tán sắc trong khí quyển
	13. Sự tán xạ	
  	Bầu trời xanh, màu xanh của các rặng núi xa, hoàng hôn màu đỏ; sự tăng cường độ màu do ô nhiễm; thạch anh xanh	Ánh sáng xanh bị tán xạ nhiều hơn ánh sáng đỏ do hiện tượng tán xạ Rayleigh, khi vật tán xạ (phân tử, hạt bụi) nhỏ hơn bước sóng ánh sáng (Hoàng hôn Tokyo © Altus Plunkett, thạch anh xanh © David Lynch)

BẢNG 7 Các nguyên nhân gây ra màu sắc (tiếp theo).

Loại	Thí dụ	Chi tiết
	Màu trắng của tóc, sữa, bọt bia, mây, sương mù, khói thuốc từ phổi, tuyết, kem sữa béo, shampoo, ngôi sao trong đá quý	Màu trắng bắt nguồn từ hiện tượng tán xạ Mie, tức là tán xạ trên các hạt lớn hơn bước sóng ánh sáng (người tuyết © Andreas Kostner)
	Màu da xanh trong thời tiết lạnh, mắt xanh, da khỉ xanh, cổ gà tây xanh, cá xanh, thằn lằn xanh, khói thuốc xanh	Màu xanh Tyndall bắt nguồn từ sự tán xạ trên các hạt nhỏ trước một nền đen sẫm (ếch độc da xanh *Dendrobates azureus* © Lee Hancock)
	Ly ruby	Màu đỏ của thuỷ tinh Murano bắt nguồn từ sự tán xạ trên các hạt vàng tí hon ở dạng keo trong thuỷ tinh cùng với cấu trúc vùng năng lượng của vàng (ly ruby © murano-glass-shop.it)
	Tính phi tuyến, hiệu ứng Raman, potassium dihydrogen phosphate (KDP)	tán xạ dịch chuyển tần số, hoạ ba bậc 2 và các tính phi tuyến khác của vật chất làm thay đổi màu sắc của ánh sáng đập vào với cường độ lớn (laser vòng nhân đôi tần số 800 nm tới 400 nm © Jeff Sherman)
	14. Giao thoa (không nhiễu xạ)	
	Xà cừ, màng dầu mỏng, bong bóng xà bông, lớp phủ trên thấu kính của máy ảnh, mắt mèo trong đêm, cánh ruồi và chuồn chuồn, vảy cá, rắn, ngọc trai, màu thép tôi	Hiện tượng giao thoa trên màng mỏng tạo ra một dãy màu tiêu chuẩn cho phép xác định độ dầy một cách chính xác (vỏ sò abalone © Anne Elliot)
	Màu phân cực của các lớp tinh thể lưỡng chiết mỏng hay các lớp polymer dầy hơn bị nén lại	Màu sắc bắt nguồn từ sự giao thoa, phụ thuộc vào chiều dày của các lớp polymer (quang đàn tính, courtesy Nevit Dilmen)

BẢNG 7 Các nguyên nhân gây ra màu sắc (tiếp theo).

Loại	Thí dụ	Chi tiết
	Cầu vồng thặng dư (xem Trang 103 trong quyển III)	Bắt nguồn từ sự giao thoa, phụ thuộc vào kích thước của giọt nước
	Bọ, bướm và lông chim ngũ sắc, ngũ sắc trên giấy bạc và xe	Bắt nguồn từ sự tán xạ trên các cấu trúc nhỏ hay các hạt nano, phụ thuộc vào góc quan sát (vịt trời © Simon Griffith)
	15. Nhiễu xạ (có giao thoa)	
	Opal	Màu sắc bắt nguồn từ các hình cầu tí hon trong nước có trong opal; màu sắc có thể thay đổi nếu opal khô đi (Opal Brazil đã đánh bóng © Opalsnopals)
	Hào quang, nhật hoa	Màu sắc bắt nguồn từ sự nhiễu xạ trên các hạt sương li ti (sự phát ngũ sắc trên đám mây ngưng tụ gần cánh phi cơ © Franz Kerschbaum)
	Cách tử nhiễu xạ, CD, đĩa vinyl, một số bọ và rắn	Màu sắc bắt nguồn từ sự nhiễu xạ và giao thoa trên các rãnh tí hon, đều đặn (CD được chiếu sáng bằng đèn flash © Alfons Reichert)
	Các tinh thể photonic	Một chủ đề nghiên cứu hiện đại
	Tinh thể lỏng Cholesteric, một số bọ	Màu sắc bắt nguồn từ sự nhiễu xạ và giao thoa tại các lớp vật chất ở bên trong tinh thể, (màu sắc của tinh thể lỏng © Ingo Dierking)
Loại VI: Màu sắc bắt nguồn từ sự giới hạn của mắt		
Màu Fechner, như trên trang lite.bu.edu/vision/applets/Color/Benham/Benham.html	con quay Benham	Màu sắc bắt nguồn từ sự đáp ứng với tốc độ khác nhau của các quang thụ thể

BẢNG 7 Các nguyên nhân gây ra màu sắc (tiếp theo).

Loại	Thí dụ	Chi tiết
Hiện tượng nội phát sinh màu khi mắt bị kích thích	Phosphenes	Xảy ra do áp suất (chà xát, hắt hơi), hay do điện từ trường
Màu do sự phân cực	Lược Haidinger	Xem Trang 113 trong quyển III
Ảo thị về màu sắc, được trình bày ở trang www.psy.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/color9e.html	Màu xuất hiện và biến mất	Các hiệu ứng bắt nguồn từ sự kết hợp giữa việc xử lý của não và sự giới hạn của mắt
Nhìn thấy màu không đúng như đã mô tả ở Trang 198 trong quyển III	Nhìn màu đỏ thành màu lục	Có thể giải thích bằng tính thích nghi quang học, khi ánh sáng đỏ tập trung trên các tế bào hình nón nhạy với màu lục
Người bị khiếm sắc thị hay 'daltonic', hãy đọc Trang 209 trong quyển III, có phổ màu bị giảm đi	khuyết sắc đỏ/lục/lam	Phân loại dựa theo mức độ cảm nhận từng màu

Sắc màu tạo nên nét quyến rũ. Sự quyến rũ luôn có ý nghĩa với việc kinh doanh; thật vậy, phần lớn kỹ nghệ hoá phẩm đều thuộc lĩnh vực tổng hợp thuốc tạo màu cho sơn, mực, quần áo, thực phẩm và mỹ phẩm. Sự tiến hoá cũng sử dụng tính quyến rũ này trong công việc của nó, cụ thể là việc lưu truyền nòi giống. Các chuyên gia trong lĩnh vực này là thực vật có hoa. Hoá học của việc tạo màu trong thực vật cực kỳ phức tạp và cũng rất thú vị trong các hãng sản xuất phẩm màu. Về mặt thực tiễn, mọi sắc tố trong hoa từ trắng, vàng, cam, đỏ tới xanh đều có nguồn gốc từ 3 loại hoá chất: *carotenoids*, *anthocyanins* (flavonoids) và *betalains*. Các sắc tố này được chứa trong những nơi đặc biệt của cánh hoa là *không bào*. Có nhiều bài báo hay viết về đề tài này.

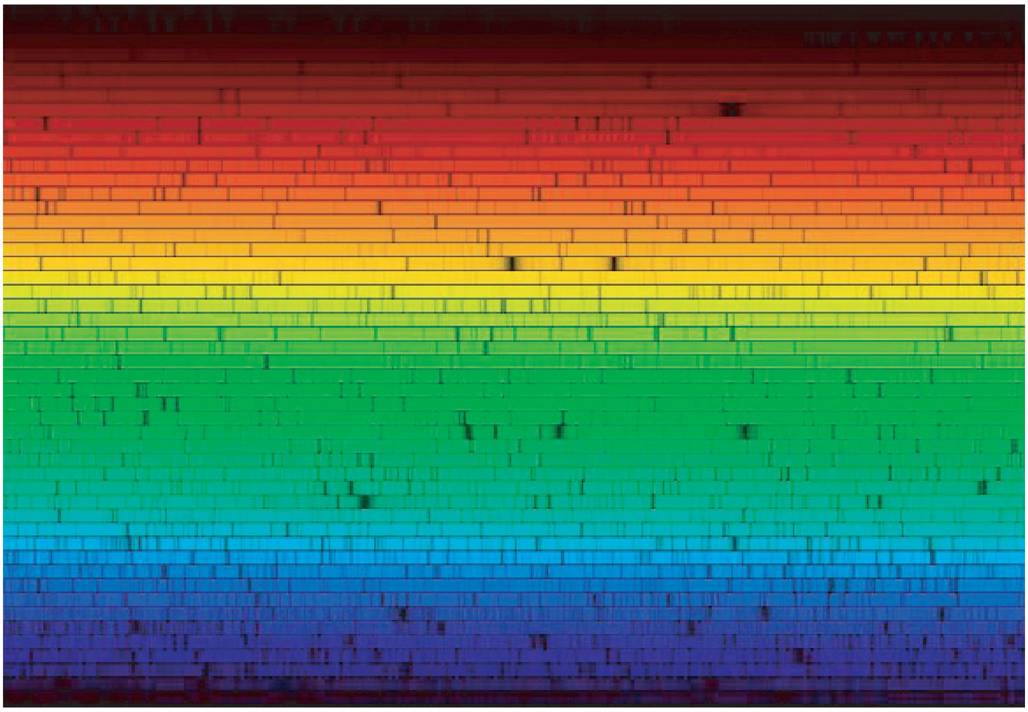
Xem 131

Mặc dù màu sắc rất phổ biến trong thực vật và động vật, nhiều loại động vật cao cấp lại không tự sản xuất ra sắc tố. Thí dụ như con người chỉ sản xuất ra một loại sắc tố: *melanin*. (*Hemoglobin*, làm cho máu có màu đỏ, không phải là một sắc tố được dành riêng mà có nhiệm vụ là chuyên chở oxygen từ phổi đi khắp cơ thể. Tương tự là *myoglobin* màu hồng trong bắp thịt.) Nhiều động vật như chim cần *ăn* những sắc tố đặc trưng cho mã bên ngoài của chúng. Màu vàng của chân bồ câu là một thí dụ. Người ta đã chứng tỏ rằng mối liên hệ giữa màu sắc và sự dinh dưỡng thường được động vật sử dụng để đánh giá bạn đời tương lai qua màu sắc của cơ thể xem đối tượng có khoẻ mạnh, có hấp dẫn hay không.

Xem 132

Điều chủ yếu là bảng trên đây đã phân biệt 6 loại nguyên nhân chính tạo ra màu sắc. Việc nghiên cứu loại đầu tiên, màu sắc do hiện tượng nóng sáng, đã dẫn Max Planck tới việc khám phá lượng tử tác dụng. Trong lúc đó, việc nghiên cứu đã khẳng định rằng trong mỗi loại, tất cả các màu sắc đều bắt nguồn từ lượng tử tác dụng $\hbar$. Người ta đã biết rõ mối liên hệ giữa lượng tử tác dụng và các tính chất vật chất của nguyên tử, phân tử, chất lỏng và chất rắn đến nỗi hiện nay ta có thể thiết kế phẩm màu trên máy tính.

Tóm lại, việc tìm hiểu các nguyên nhân tạo ra màu sắc được tìm thấy trong thiên nhiên khẳng định rằng mọi màu sắc đều bắt nguồn từ các hiệu ứng lượng tử. Ta sẽ chứng minh điều này qua một thí dụ đơn giản nhất: màu sắc của hơi nguyên tử bị kích thích.



HÌNH 77 Quang phổ của ánh sáng ban ngày: Hình ảnh chồng chất của quang phổ mở rộng, cho thấy các vạch Fraunhofer của nó (© Nigel Sharp, NOAO, FTS, NSO, KPNO, AURA, NSF).

SỬ DỤNG CẦU VỒNG ĐỂ XÁC ĐỊNH CẤU TẠO CỦA CÁC NGÔI SAO

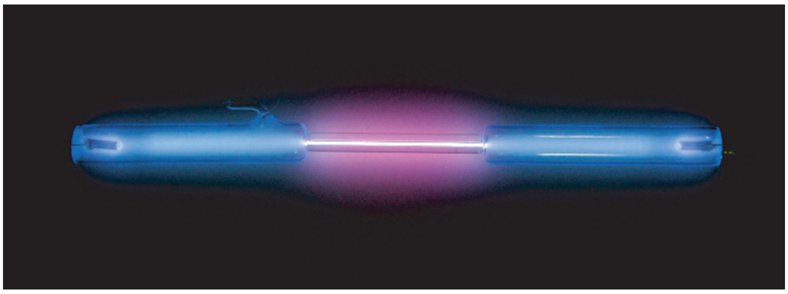
Cuối thế kỷ 17, nhà sản xuất dụng cụ người Bavaria Joseph Fraunhofer * và vật lý gia Anh William Wollaston đã nhận thấy rằng quang phổ Mặt trời *thiếu* một số màu nào đó. Những màu này xuất hiện là các vạch đen khi quang phổ được trải rộng. Hình 77 cho thấy rõ các vạch này; ngày nay chúng được gọi là *các vạch Fraunhofer*. Năm 1860, Gustav Kirchhoff và Robert Bunsen đã chứng tỏ rằng các màu *bị thiếu* trong quang phổ chính xác là các màu của các nguyên tố nào đó *phát ra* khi bị nung nóng. Dựa theo lập luận này họ đã chứng tỏ rằng natrium, calcium, barium, nickel, magnesium, kẽm, đồng và sắt có mặt trong Mặt trời. Quan sát quang phổ ta sẽ biết cấu tạo của Mặt trời.

Trong số 476 vạch Fraunhofer mà Kirchhoff và Bunsen đã quan sát, có 13 vạch không tương ứng với nguyên tố nào. Năm 1868, Jules Janssen và Joseph Lockyer đã tiên đoán một cách độc lập rằng các vạch chưa biết này thuộc về một nguyên tố chưa được khám

---

* Joseph Fraunhofer (b. 1787 Straubing, d. 1826 Munich), mồ côi từ năm 11 tuổi, đã học mài thấu kính. Ông tự học quang học từ sách vở. Ông gia nhập một công ty quang học lúc 19 tuổi, phát triển kinh doanh bằng việc sản xuất các thấu kính, kính thiên văn, trắc vi kế, cách tử và các quang hệ tốt nhất vào thời đó. Ông phát minh quang phổ nghiệm và nhật kế. Ông đã khám phá và đã đếm được 476 vạch trong quang phổ của Mặt trời; bây giờ các vạch này mang tên ông. (Ngày nay, các vạch Fraunhofer vẫn được sử dụng làm các chuẩn đo lường: giây và mét được định nghĩa theo các chuẩn này.) Các vật lý gia trên thế giới mua thiết bị do ông sản xuất, thăm viếng và hỏi chép các bài báo. Ngay cả khi ông đã qua đời, trải qua nhiều thế hệ, sản phẩm của ông vẫn đứng đầu. Bằng kính thiên văn do ông sản xuất, vào năm 1837 Bessel đã có thể đo được thị sai của một ngôi sao và năm 1846 Johann Gottfried Galle đã khám phá ra Hải vương tinh. Fraunhofer trở thành giáo sư năm 1819. Ông mất sớm vì hậu quả của nhiều năm làm việc với chì và bụi thuỷ tinh.

Quyển II, trang 319



HÌNH 78 Sự phóng điện qua khí hydrogen áp suất thấp trong một ống thuỷ tinh dài 20 cm (© Jürgen Bauer ở trang www.smart-elements.com).

phá. Nguyên tố này đã được thực sự tìm thấy trên Trái đất trong một khoáng chất có uranium tên là cleveite, năm 1895. Nguyên tố mới được gọi là *helium*, từ tiếng Hy Lạp ἥλιος 'helios' – Mặt trời.

Năm 1925, bằng cách sử dụng phương trình của Saha và Langmuir, nhà vật lý trẻ Cecilia Payne (b. 1900 Wendover, England, d. 1979 Cambridge, Massachusetts) đã trình bày cách tính tỷ lệ phần trăm của mỗi nguyên tố từ quang phổ của một ngôi sao. Cô đã thể hiện điều này trong luận án Tiến sĩ xuất sắc của mình. Điều chủ yếu là cô đã tìm thấy hydrogen và helium là hai nguyên tố có nhiều nhất trong Mặt trời, các ngôi sao và như vậy là trong cả vũ trụ. Điều này hoàn toàn ngược với suy nghĩ của thời đó nhưng bây giờ đã là kiến thức phổ thông. Payne đã hoàn tất học trình ở Cambridge, UK, nhưng không được nhận bằng vì là phụ nữ. Vì vậy cô sang Mỹ, nơi cô được tôn trọng hơn và cô hoàn thành luận án Tiến sĩ rồi dần dần trở thành giáo sư đại học Harvard, để rồi sau đó là Trưởng bộ môn Thiên văn học. Điều quan trọng là Payne đã trở thành một điển hình đặc biệt cho nhiều nữ khoa học gia. Mặc dù là nguyên tố phổ biến thứ nhì trong vũ trụ, helium rất hiếm trên Trái đất vì nó là một khí trơ nhẹ khó kết hợp để tạo ra các hợp chất hoá học. Các nguyên tử Helium trên Trái đất bay lên và đi vào không gian.

Việc tìm hiểu các vạch màu do mỗi nguyên tố sinh ra đã bắt đầu trở nên hấp dẫn trước khi phát hiện helium nhưng sau đó sự quan tâm còn tăng mạnh hơn nhờ sự gia tăng số ứng dụng kiến thức về màu sắc trong Hoá học, Vật lý, Công nghệ, Tinh thể học, Sinh học và laser. Màu sắc là một ngành kinh doanh quan trọng giống như kỹ nghệ thời trang, truyền thông và quảng cáo.

Tóm lại, màu sắc là một hoà trộn đặc biệt của các tần số ánh sáng. Ánh sáng là một sóng điện từ và được các điện tích chuyển động phát ra. Đối với các nhà vật lý, màu sắc là kết quả của sự tương tác của vật chất tích điện với trường điện từ. Đến đây thì ta không thể giải thích các vạch màu *sắc nét* bằng Điện động lực học cổ điển. Ta cần Thuyết lượng tử để giải thích chúng.

Quyển III, trang 125

Điều gì xác định màu sắc của các nguyên tử?

Các màu đơn giản nhất để ta nghiên cứu chính là các vạch màu sắc nét do các nguyên tử đơn lẻ phát xạ hay hấp thu. Các nguyên tử đơn lẻ được tìm thấy trong chất khí. Nguyên tử đơn giản nhất là nguyên tử hydrogen. Như ta đã thấy trong Hình 78, khí hydrogen nóng phát ra ánh sáng. Ánh sáng bao gồm nhiều vạch phổ sắc nét như ta thấy trong hình bên trái của Hình 79. Từ năm 1885, một giáo viên Thuỵ Sĩ là Johann Balmer (1828–1898)

đã khám phá ra bước sóng các vạch phổ khả kiến của hydrogen nghiệm đúng công thức:

$$\frac{1}{\lambda_m} = R\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2}\right) \quad \text{với} \quad m = 3, 4, 5, \ldots \,. \tag{91}$$

Sau khi đo đạc cẩn thận luôn cả các vạch phổ hydrogen trong vùng hồng ngoại và tử ngoại, Johannes Rydberg (1854–1919) đã tổng quát hoá công thức này thành:

$$\frac{1}{\lambda_{mn}} = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right) \,, \tag{92}$$

trong đó n và $m > n$ là các số nguyên dương và *hằng số Rydberg* R có giá trị $10.97\,\mu\text{m}^{-1}$; giá trị nghịch đảo $1/R = 91.16\,\text{nm}$ thì dễ nhớ hơn. Mọi vạch màu do hydrogen phát xạ đều thoả công thức đơn giản này. Vật lý cổ điển không thể giải thích kết quả này. Như vậy ở đây Thuyết lượng tử có một thách thức được xác định rõ ràng: giải thích công thức và giá trị của R.

Chuyển mức λ_{21} đối với hydrogen được gọi là *vạch Lyman-alpha*. Bước sóng của nó, 121.6 nm, nằm trong vùng tử ngoại. Rất dễ quan sát thấy vạch này bằng kính thiên văn, vì phần lớn các ngôi sao khả kiến bao gồm hydrogen ở trạng thái kích thích. Vạch Lyman-alpha thường được sử dụng để xác định tốc độ của các ngôi sao hay thiên hà ở xa, vì *hiệu ứng Doppler* làm thay đổi bước sóng khi tốc độ lớn. Kỷ lục là năm 2004 một thiên hà có độ dịch chuyển vạch Lyman-alpha lên tới 1337 nm. Bạn có thể tính tốc độ ra xa Trái đất của thiên hà đó không?

Xem 133

Câu đố 122 s

Ngay từ đầu, rõ ràng là màu sắc của hydrogen bắt nguồn từ chuyển động của electron. (Tại sao?) Cách đầu tiên để suy ra công thức Balmer từ lượng tử tác dụng do Niels Bohr tìm được năm 1903. Bohr đã hiểu rằng khác với hành tinh chuyển động quanh Mặt trời, electron chuyển động quanh proton chỉ có thể có một số các trạng thái chuyển động khả hữu rời rạc: moment động lượng của electron được lượng tử hoá. Giả sử moment động lượng của electron là một số nguyên lần của $\hbar$, ta sẽ trực tiếp suy ra được công thức Balmer và giá trị của hằng số Rydberg R. Tính toán này nổi tiếng đến nỗi nó được tìm thấy trong nhiều sách giáo khoa trung học. Kết quả này cũng đã củng cố quyết định của Bohr khi dành cuộc đời mình cho việc nghiên cứu cấu trúc của nguyên tử.

Câu đố 123 e

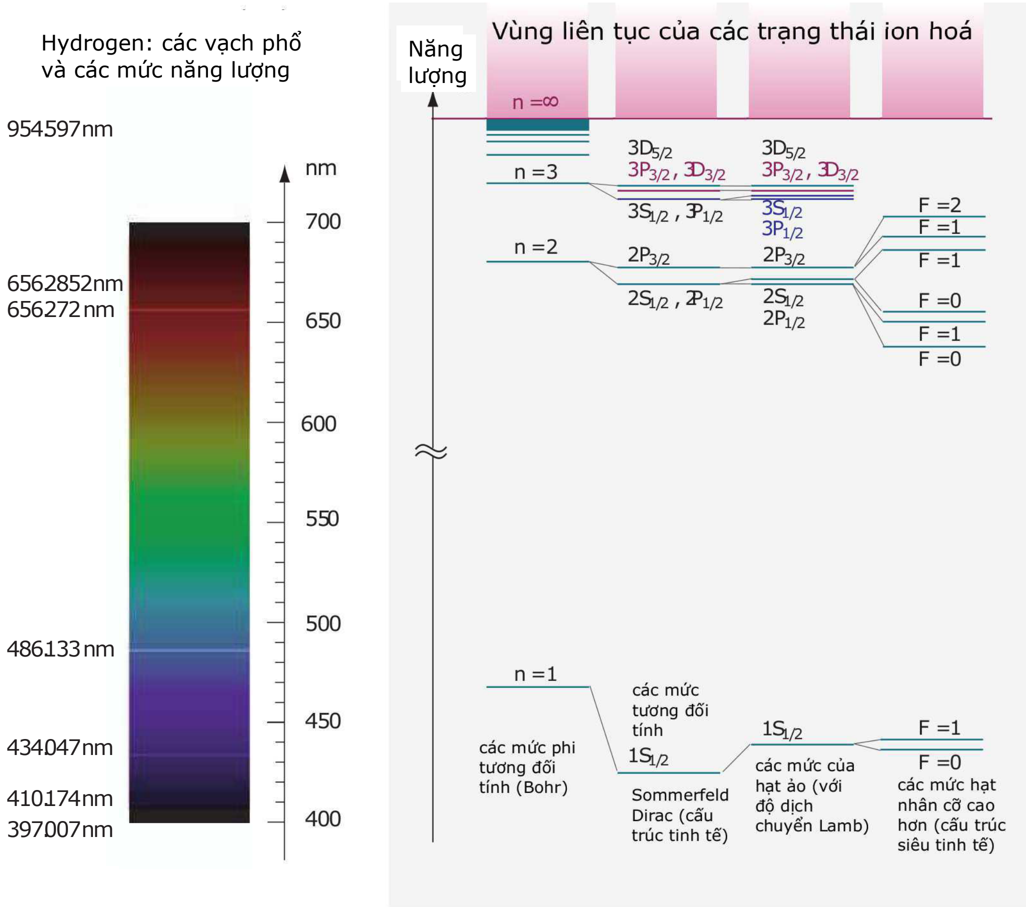
Trang 82

Hai mươi năm sau, vào năm 1926, Erwin Schrödinger đã giải phương trình chuyển động của một electron chuyển động trong thế tĩnh điện $V(r) = e^2/4\pi\varepsilon_0 r$ của một proton xem như chất điểm. Schrödinger đã tìm lại được kết quả của Bohr, suy ra công thức Balmer và trở nên nổi tiếng trong giới vật lý. Tuy vậy, tính toán quan trọng này khá dài và phức tạp.

Để hiểu được màu sắc của hydrogen, ta không cần giải phương trình chuyển động của điện tử; chỉ cần so sánh năng lượng của trạng thái đầu và trạng thái cuối của electron. Điều này có thể thực hiện rất dễ dàng nếu ta nhận thấy rằng tác dụng phải là bội của $\hbar/2$. Cách tiếp cận này là sự tổng quát hoá giải thích của Bohr, do Einstein, Brillouin và Keller phát triển và bây giờ được gọi là sự lượng tử hoá EBK. Nó dựa trên sự kiện tác dụng S của một hệ lượng tử tuân theo công thức

Xem 134

$$S = \frac{1}{2\pi}\oint \mathrm{d}q_i\, p_i = \left(n_i + \frac{\mu_i}{4}\right)\hbar \tag{93}$$



HÌNH 79 Hydrogen nguyên tử: quang phổ khả kiến của hydrogen (NASA) và các mức năng lượng của nó, được tính với 4 mức gần đúng có độ chính xác tăng dần. Bạn có thể liên kết các vạch phổ khả kiến với các chuyển mức tương ứng không?

đối với mọi toạ độ q_i và moment liên hợp của nó p_i. Biểu thức phản ánh sự tương tự giữa moment động lượng và tác dụng. Ở đây, n_i có thể bằng 0 hay một số nguyên dương bất kỳ và μ_i được gọi là *chỉ số Maslov*, một số nguyên chẵn, mà trong trường hợp nguyên tử, nó bằng 2 đối với toạ độ theo tia và phương vị, r và θ, và bằng 0 đối với góc quay φ. Tích phân được lấy theo cả quỹ đạo. Nói một cách đơn giản, *tác dụng S là một bội bán nguyên của lượng tử tác dụng*. Ta có thể sử dụng kết quả này để tính các mức năng lượng của các hệ lượng tử tuần hoàn. Ta hãy thử làm với các nguyên tử hydrogen.

Một chuyển động quay bất kỳ trong một thế đối xứng cầu $V(r)$ đều được đặc trưng bởi một năng lượng không đổi E và các moment động lượng không đổi L và L_z. Do đó

Câu đố 124 ny

các động lượng liên hợp đối với toạ độ r, θ và φ là

$$p_r = \sqrt{2m(E - V(r)) - \frac{L^2}{r^2}}$$
$$p_\theta = \sqrt{L^2 - \frac{L_z^2}{\sin^2\theta}}$$
$$p_\varphi = L_z \,. \qquad (94)$$

Sử dụng các biểu thức này trong phương trình (93) và đặt $n = n_r + n_\theta + n_\varphi + 1$, ta kiếm được * kết quả

$$E_n = -\frac{1}{n^2}\frac{me^4}{2(4\pi\varepsilon_0)^2\hbar^2} = -\frac{Rhc}{n^2} = -\frac{c^2 m\alpha^2}{2n^2} \approx -\frac{2.19\,\text{aJ}}{n^2} \approx -\frac{13.6\,\text{eV}}{n^2}\,. \qquad (97)$$

Các mức năng lượng E_n này, các mức Bohr phi tương đối tính, được biểu diễn trong Hình 79. Sử dụng quan niệm nguyên tử hydrogen phát ra một photon khi electron của nó chuyển từ trạng thái E_n sang E_m, ta kiếm được đúng công thức do Balmer và Rydberg tìm ra từ thực nghiệm! Sự tương hợp giữa thực nghiệm và tính toán vào khoảng 4 chữ số. Gần như đây là lần đầu tiên, một tính chất của vật chất, màu sắc của các nguyên tử hydrogen, đã được giải thích từ một nguyên lý cơ bản của thiên nhiên. Điểm then chốt của sự giải thích này là lượng tử tác dụng $\hbar$. (Toàn bộ các lập luận đều giả sử rằng các electron trong nguyên tử hydrogen phát xạ ánh sáng đều ở trong các trạng thái riêng. Bạn có thể chứng minh tính đúng đắn của điều này không?)

Câu đố 126 e
Câu đố 127 s

Tóm lại, lượng tử tác dụng hàm ý rằng các electron trong một nguyên tử chỉ được phép nhận các giá trị năng lượng riêng nào đó. Mức năng lượng thấp nhất, khi $n = 1$, được gọi là *trạng thái cơ bản*. Giá trị của nó 2.19 aJ là *năng lượng ion hoá* của hydrogen; nếu năng lượng đó được thêm vào trạng thái cơ bản, electron không còn liên kết với hạt nhân nữa. Năng lượng ion hoá đối với các electron chuyển động quanh nguyên tử đóng vai trò như *vận tốc thoát*, hay đúng hơn, *năng lượng* thoát, của vệ tinh hay hoả tiễn phóng lên từ hành tinh.

Cách mà lượng tử tác dụng xác định màu sắc của nguyên tử hydrogen cũng giống như cách nó xác định màu sắc của mọi nguyên tử khác. Tất cả các vạch Fraunhofer, dù được quan sát trong vùng hồng ngoại, khả kiến hay tử ngoại đều bắt nguồn từ lượng tử tác dụng. Thật ra mọi màu trong thiên nhiên đều bắt nguồn từ một sự hoà trộn của các

Trang 181

* Tính toán này cũng dễ hiểu. Sau khi thay $V(r) = e/4\pi\varepsilon_0 r$ vào phương trình (94) ta cần lấy tích phân một cách khéo léo. Sử dụng kết quả tổng quát

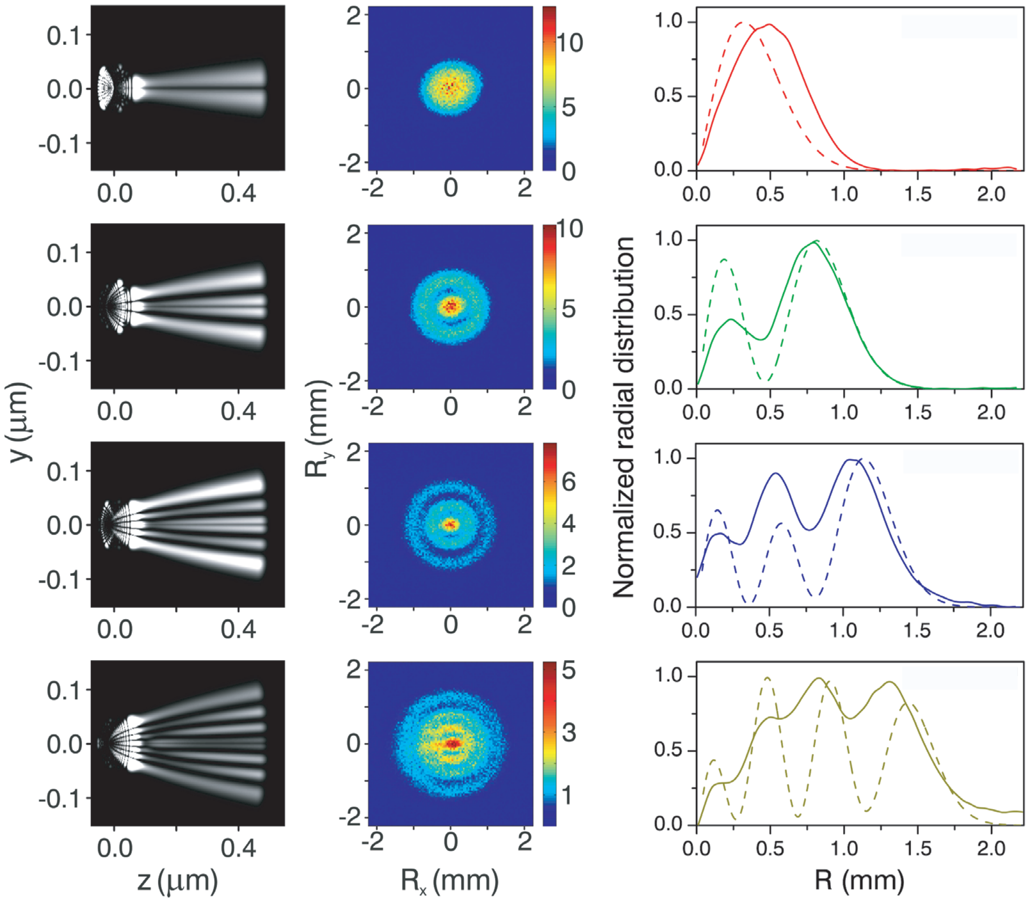
Câu đố 125 ny

$$\frac{1}{2\pi}\oint \frac{\mathrm{d}z}{z}\sqrt{Az^2 + 2Bz - C} = -\sqrt{C} + \frac{B}{\sqrt{-A}} \qquad (95)$$

ta có

$$\left(n_r + \frac{1}{2}\right)\hbar + L = n\hbar = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\sqrt{\frac{m}{-2E}}\,. \qquad (96)$$

Công thức này dẫn tới công thức năng lượng (97).



HÌNH 80 Hình vẽ đã cho thấy cấu trúc nút theo tính toán và theo thực nghiệm của nguyên tử hydrogen nằm trong điện trường ngoài yếu, đã được phóng đại bằng các thấu kính tĩnh điện. Các kiểu thức là các hình chiếu giao thoa 2 chiều của các hàm sóng. Cột bên trái: cách thức chiếu hàm sóng từ các nguyên tử tới màn vĩ mô; cột giữa: cấu trúc nút đã đo được; cột bên phải: so sánh giữa mật độ electron đo được (nét liền) và mật độ electron theo tính toán (nét rời). (© Aneta Stodolna/APS, từ Xem 138).

vạch màu kể cả các màu của chất rắn và chất lỏng cũng được xác định bởi lượng tử tác dụng.

Hình dạng của các nguyên tử

Các nguyên tử tự do hình cầu. Trong trường ngoài, các nguyên tử sẽ bị biến dạng. Dù ở trong trường hợp nào, hình dạng của các nguyên tử đều bắt nguồn từ hình dạng của các hàm sóng. Trường hợp đơn giản nhất là nguyên tử hydrogen. Các hàm sóng của nó – hay chính xác hơn, các hàm riêng đối với vài mức năng lượng đầu tiên – được minh hoạ trên hình ở bên phải của Hình 81. Những hàm này đã được Erwin Schrödinger tính toán năm 1926 và được tìm thấy trong tất cả các sách giáo khoa. Ở đây ta không tính toán mà chỉ đưa ra kết quả.

Bình phương của hàm sóng là mật độ xác suất của electron. Mật độ này giảm đi nhanh

chóng khi khoảng cách đến hạt nhân tăng lên. Giống như các đám mây thực, mật độ này luôn khác 0, kể cả khi khoảng cách lớn. Như vậy ta có thể chứng tỏ rằng mọi nguyên tử đều có kích thước vô hạn. Trong thực tế, các liên kết hoá học hay sự sắp xếp của các nguyên tử trong chất rắn đều cho thấy việc mô tả như vậy thì thích hợp hơn là tưởng tượng các nguyên tử giống như các đám mây có kích thước hữu hạn.

Điều đáng ngạc nhiên là phép đo hàm sóng của một nguyên tử lần đầu tiên chỉ diễn ra từ năm 2013; nó đã được Aneta Stodolna và các cộng sự thực hiện bằng một kỹ thuật quang ion hoá thông minh. Kết quả đẹp đẽ của thí nghiệm được trình bày trong Hình 80. Các hình vẽ cho ta thấy các hàm sóng, khác với mật độ xác suất, có các nút, tức là các đường – hay chính xác hơn, các mặt – nơi mà giá trị của chúng bằng 0.

Xem 138

Tóm lại, mọi thí nghiệm đều khẳng định rằng electron trong nguyên tử hydrogen đã tạo ra các hàm sóng đúng như những điều mà Thuyết lượng tử đã tiên đoán. Đặc biệt, hình dạng của các nguyên tử được tìm thấy đều phù hợp với sự tính toán của Cơ học lượng tử.

Kích thước của các nguyên tử

Việc tính toán các mức năng lượng của hydrogen cũng cho ta bán kính quỹ đạo hiệu dụng của electron. Đó là

$$r_n = n^2 \frac{\hbar^2 4\pi\varepsilon_0}{m_e e^2} = \frac{\hbar}{m_e c\alpha} = n^2 a_0 \approx n^2\, 52.918\,937\ \text{pm}\ ,\ \text{với}\, n = 1, 2, 3, \ldots \qquad (98)$$

Một lần nữa ta lại thấy, khác với Vật lý cổ điển, Thuyết lượng tử chỉ cho phép electron chuyển động quanh hạt nhân theo những quỹ đạo đặc biệt nào đó. (Hãy xem dưới đây để biết thêm chi tiết về hằng số cấu trúc tinh tế α.) Nói chính xác hơn, các bán kính này là kích thước trung bình của các đám mây electron quanh hạt nhân. Bán kính vân đạo nhỏ nhất, 53 pm khi $n = 1$, được gọi là *bán kính Bohr*, ký hiệu a_0.

Page 189, page 197

Trong chất khí của các nguyên tử hydrogen, phần lớn nguyên tử ở trạng thái cơ bản có $r_1 = a_0$ và E_1. Nói cách khác, Thuyết lượng tử dẫn tới kết quả là nguyên tử hydrogen bị kích thích lên tới mức $n = 500$ thì có kích thước khoảng 12 μm: lớn hơn nhiều vi khuẩn! Những nguyên tử bùng nổ như vậy, thường được gọi là *nguyên tử Rydberg*, thực ra đã được quan sát trong phòng thí nghiệm, mặc dù chúng cực kỳ nhạy với các nhiễu loạn.

Xem 135

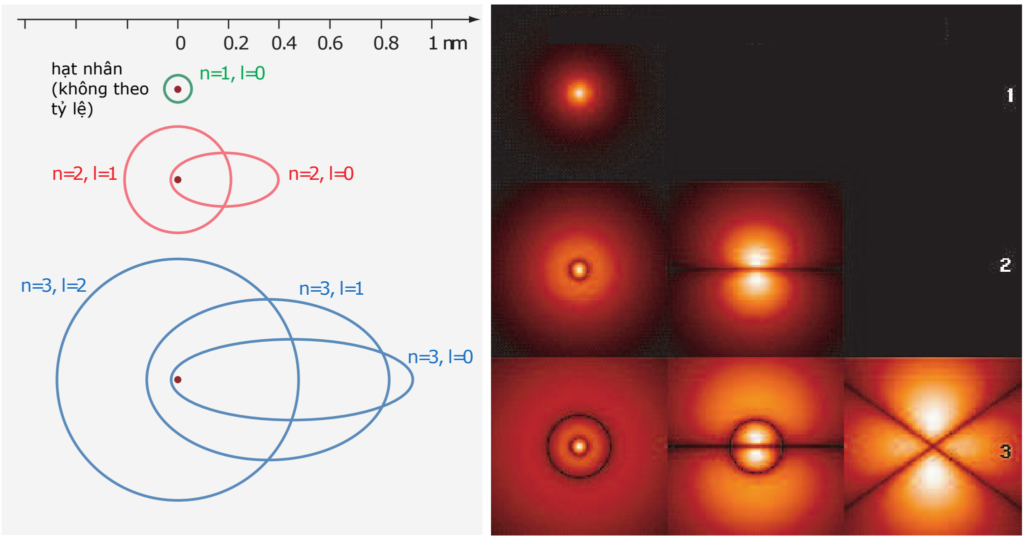
Tóm lại, lượng tử tác dụng xác định *kích thước của các nguyên tử*. Như vậy kết quả này khẳng định sự tiên đoán của Arthur Erich Haas từ năm 1910. Nói cách khác

Trang 21

▷ Lượng tử tác dụng xác định kích thước của mọi vật.

Năm 1915, Arnold Sommerfeld đã hiểu rằng sự tương tự giữa chuyển động của electron và chuyển động theo quỹ đạo do lực hấp dẫn có thể dùng lại theo 2 cách. Trước hết, electron có thể chuyển động, tính trung bình, trên các *ellipse* thay vì vòng tròn. Sự lượng tử hoá moment động lượng hàm ý rằng tâm sai chỉ có thể có một số giá trị. Moment động lượng càng lớn, số khả năng càng nhiều: một vài trị đầu tiên được trình bày trong Hình 81. Tâm sai lớn nhất tương ứng với giá trị cực tiểu $l = 0$ của số lượng tử phương vị, trong đó trường hợp $l = n - 1$ tương ứng với các quỹ đạo tròn. Ngoài ra, các

Xem 137



HÌNH 81 Các quỹ đạo electron của nguyên tử hydrogen theo mô hình của Bohr–Sommerfeld theo tưởng tượng (không đúng thực tế) (hình bên trái) và mô tả đúng, sử dụng mật độ xác suất của electron trong những trạng thái khác nhau (hình bên phải) (© Wikimedia).

ellipse có thể có hướng khác nhau trong không gian.

Điểm thứ hai mà Sommerfeld có lưu ý là tốc độ của electron trong nguyên tử hydrogen – ít nhiều gì đó – có tương đối tính: giá trị tốc độ không thể bỏ qua so với tốc độ ánh sáng. Thật vậy, tần số chuyển động của electron là

$$f_n = \frac{1}{n^3}\frac{e^4 m_e}{4\varepsilon_0^2 h^3} = \frac{1}{n^3}\frac{m_e c^2 \alpha^2}{h} \approx \frac{6.7\,\text{PHz}}{n^3} \tag{99}$$

và tốc độ của electron là

$$v_n = \frac{1}{n}\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar} = \frac{\alpha c}{n} \approx \frac{2.2\,\text{Mm/s}}{n} \approx \frac{0.007\,c}{n} \;. \tag{100}$$

Như ta đã tiên đoán, electron càng xa hạt nhân thì chuyển động càng chậm. Kết quả này cũng có thể kiểm chứng bằng thực nghiệm: sự hoán đổi electron và muon cho phép ta đo độ giãn thời gian của thời gian sống. Các phép đo tuyệt hảo đã phù hợp khá tốt với các tính toán.

Xem 136

Tóm lại, Sommerfeld đã nhận xét rằng tính toán của Bohr đã không tính đến các hiệu ứng tương đối tính. Và các phép đo có độ chính xác cao cho ta thấy có sự khác nhau nhỏ giữa các mức năng lượng phi tương đối tính của Bohr và các trị số đo được.

Hydrogen tương đối tính

Người ta có thể đo các mức năng lượng nguyên tử với độ chính xác cao hơn đo các hàm sóng. Đặc biệt, việc đo mức năng lượng cho phép ta quan sát được các hiệu ứng tương đối tính.

Cũng trong trường hợp tương đối tính, tác dụng EBK phải bằng một bội của $\hbar/2$. Từ biểu thức tương đối tính của động năng electron trong nguyên tử hydrogen

Xem 134

$$E + c^2 m = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} \qquad (101)$$

Câu đố 128 e

ta kiếm được biểu thức

$$p_r^2 = 2mE\left(1 + \frac{E}{2c^2 m}\right) + \frac{2me^2}{4\pi\varepsilon_0 r}\left(1 + \frac{E}{c^2 m}\right) . \qquad (102)$$

Để cho thuận tiện, ta đưa thêm *hằng số cấu trúc tinh tế*, $\alpha = e^2/(4\pi\varepsilon_0 \hbar c) = \sqrt{4\pi\hbar R/mc} \approx 1/137.036$. ($\alpha$ là một số không thứ nguyên; $R = 10.97\,\mu\text{m}^{-1}$ là hằng số Rydberg.) Tác dụng EBK theo tia sẽ dẫn đến biểu thức

Câu đố 129 e

$$E_{nl} + c^2 m = \frac{c^2 m}{\sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{\left(n - l - \frac{1}{2} + \sqrt{(l + \frac{1}{2})^2 - \alpha^2}\right)^2}}} . \qquad (103)$$

Kết quả này, được Arnold Sommerfeld tìm được lần đầu tiên năm 1915, đúng cho trường hợp chất điểm, tức là cho electron không quay. Trong thực tế, electron có spin 1/2; ta sẽ có các mức năng lượng tương đối tính chính xác khi đặt $l = j \pm 1/2$ vào công thức trên. Kết quả gần đúng là

$$E_{nj} = -\frac{R}{n^2}\left(1 + \frac{\alpha^2}{n^2}\left(\frac{n}{j + \frac{1}{2}} - \frac{3}{4}\right) + ...\right) . \qquad (104)$$

Nó sẽ cho ta dựng lại quang phổ hydrogen với độ chính xác cực cao. Nếu ta so sánh kết quả này với kết quả phi tương đối tính, ta sẽ thấy rằng mỗi mức phi tương đối tính n bị tách thành n mức khác nhau. Sự tách mức này được minh hoạ trong Hình 79. Trong các thí nghiệm chính xác, sự tách các vạch phổ hydrogen được gọi là *cấu trúc tinh tế*. Độ lớn của cấu trúc tinh tế phụ thuộc α, một hằng số cơ bản của thiên nhiên. Vì Arnold Sommerfeld phát hiện sự quan trọng của hằng số cơ bản trong ngữ cảnh này nên ông chọn tên *hằng số cấu trúc tinh tế*, đã được toàn thế giới chấp nhận. Hằng số cấu trúc tinh tế mô tả *cường độ* tương tác điện từ; nó là hằng số liên kết điện từ.

Trang 184

Trang 197

Các thí nghiệm hiện đại có độ chính xác cao cho ta thấy các hiệu ứng bổ sung đã điều chỉnh màu sắc của nguyên tử hydrogen. Chúng cũng đã được minh hoạ trong Hình 79. Các hiệu ứng hạt ảo và sự liên kết của spin proton bổ sung thêm các phần hiệu chỉnh. Nhưng đó chưa phải là tất cả: hiệu ứng đồng vị, dịch chuyển Doppler và dịch chuyển các mức năng lượng do điện từ trường của môi trường cũng ảnh hưởng đến quang phổ của hydrogen. Hiệu ứng sau cùng, dịch chuyển Lamb nổi tiếng, sẽ là chủ đề tiếp theo.

Trang 184

Quyển V, trang 125



HÌNH 82 Paul Dirac (1902–1984)

GẶP LẠI PHƯƠNG TRÌNH SÓNG TƯƠNG ĐỐI TÍNH

> “Phương trình này thông minh hơn tôi.”
> Paul Dirac nói về phương trình của ông, lặp lại một phát biểu của Heinrich Hertz.

Phương trình tiến hoá của hàm sóng sẽ thay đổi như thế nào nếu ta có tính đến Thuyết tương đối, spin và các tương tác với điện từ trường? Ta có thể tổng quát hoá một trường hợp có các hạt và tương tác điện từ do Foldy và Wouthuysen đã đưa ra. Không may là vấn đề này không đơn giản. Việc đồng nhất một cách đơn giản giữa các mô tả cổ điển và cơ lượng tử sẽ thất bại nếu bao gồm cả các hiện tượng điện từ.

Trang 106

Các hạt lượng tử *có mang điện* được mô tả tốt nhất bằng các biểu diễn khác, tương đương, của Hamiltonian, do vật lý gia Anh Paul Dirac khám phá đã lâu từ năm 1926.* Dirac đã tìm được một thủ thuật ngắn gọn để lấy căn bậc hai trong toán tử năng lượng tương đối tính. Trong cách biểu diễn của Dirac, toán tử Hamilton có dạng

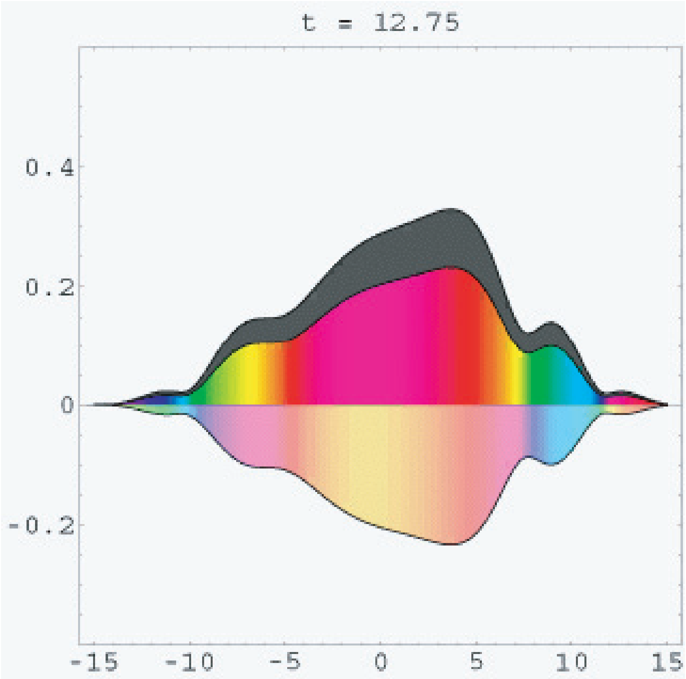
$$H_{\text{Dirac}} = \beta m + \boldsymbol{\alpha} \cdot p \,. \tag{105}$$

Đại lượng β và 3 thành phần $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \boldsymbol{\alpha}$ hoá ra là matrix 4×4 phức.

Trong biểu diễn Dirac, toán tử vị trí x không phải là vị trí của hạt nhưng có các số hạng bổ sung; toán tử vận tốc chỉ có các trị riêng cộng hay trừ với vận tốc ánh sáng; toán tử vận tốc không liên hệ một cách đơn giản với toán tử động lượng; phương trình chuyển động chứa số hạng ‘Zitterbewegung’ nổi tiếng; moment động lượng quỹ đạo và spin không phải là các hằng số chuyển động riêng biệt.

Tại sao lại sử dụng Hamiltonian rùng rợn này? Vì ta chỉ có thể dễ dàng sử dụng Hamiltonian Dirac cho các điện tích. Ngoài ra, nó được biến đổi thành Hamiltonian

* Paul Adrien Maurice Dirac (b. 1902 Bristol, d. 1984 Tallahassee), vật lý gia nói được hai thứ tiếng, học về điện kỹ thuật ở Bristol, rồi chuyển tới Cambridge, nơi mà sau này ông trở thành giáo sư, giữ chức vụ mà Newton đã từng đảm nhiệm. Trong những năm từ 1925 đến 1933 ông công bố một loạt các bài báo, trong đó có nhiều bài xứng đáng được giải Nobel; ông đã nhận giải này năm 1933. Dirac đã thống nhất Thuyết tương đối đặc biệt và Thuyết lượng tử, tiên đoán về phản vật chất, nghiên cứu về spin và Thống kê học, tiên đoán về các đơn cực từ, nghiên cứu về luật các số lớn và nhiều đề tài khác nữa. Tính cách thiên nhiều về nội tâm, thân thiện nhưng nhút nhát, có một nhãn quan sâu sắc về thiên nhiên, kết hợp với sự hết mình vì vẻ đẹp của vật lý lý thuyết, đã biến ông thành một thiên tài hiếm có trên thế giới. Trong nửa cuối đời ông đã cố gắng nhưng không thành công để tìm ra một lý thuyết thay thế cho Điện động lực học lượng tử, mà ông là người đã đặt nền tảng cho nó, vì ông vẫn luôn mãi băn khoăn về bài toán vô hạn. Ông mất ở Florida, nơi ông sống và làm việc sau khi nghỉ hưu từ trường Cambridge.



HÌNH 83 Chuyển động run rẩy nổi tiếng: sự chồng chập các trạng thái năng lượng dương và âm mà kết quả là sự dao động quanh một giá trị trung bình. Màu sắc biểu diễn cho phase; các đường cong có hai màu như ta đã thấy vì phương trình Dirac 1 chiều chỉ có 2 thành phần (chứ không phải 4); đường cong xám là mật độ xác suất. (QuickTime film © Bernd Thaller)

liên kết với điện từ trường bằng *liên kết cực tiểu*, tức là bằng phép thế

Quyển III, trang 86

$$\boldsymbol{p} \rightarrow \boldsymbol{p} - q\boldsymbol{A} , \qquad (106)$$

tức là xem động lượng điện từ như động lượng của hạt. Với quy định này, Hamiltonian Dirac mô tả chuyển động của các hạt mang điện tương tác với điện từ trường $\boldsymbol{A}$. Không thể dùng phép thế tương tác cực tiểu trong Hamiltonian Foldy–Wouthuysen. Trong biểu diễn của Dirac, các hạt là các điện tích thuần, giống chất điểm, không có cấu trúc; trong biểu diễn của Foldy–Wouthuysen chúng cần một bán kính của điện tích và một tương tác moment-từ. (Ta sẽ nói lý do dưới đây, trong phần nói về QED.)

Xem 139

Nói rõ hơn thì sự mô tả electron đơn giản nhất (hay bất kỳ một điện tích sơ cấp, bền, có spin 1/2) được biểu diễn bằng tác dụng S và Lagrangian

$$S = \int \mathcal{L}_{\text{QED}} d^4x \quad \text{trong đó} \qquad (107)$$

$$\mathcal{L}_{\text{QED}} = \overline{\psi}\,(i\hbar c \not{D} - c^2 m)\,\psi - \frac{1}{4\mu_0} F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \quad \text{và}$$

$$\not{D}_\mu = \gamma^\mu(\partial_\mu - ieA_\mu)$$

Thứ nhất, số hạng vật chất trong Lagrangian dẫn đến phương trình Dirac: nó mô tả cách điện từ trường làm các hạt sơ cấp, có mang điện, spin 1/2, chuyển động. Thứ hai, số hạng bức xạ dẫn đến phương trình Maxwell, nó mô tả cách mà hàm sóng của các điện tích

làm điện từ trường chuyển động. Cùng với một vài thủ thuật tính toán, các phương trình này mô tả điều thường được gọi là *Điện động học lượng tử*, viết tắt là QED.

Với trình độ hiểu biết ngày nay, sự mô tả tương đối tính chuyển động của điện tích và điện từ trường với Lagrangian QED đã cho (107) khá *hoàn hảo*: người ta thấy không có sự sai biệt nào giữa lý thuyết và thực nghiệm, mặc dù đã có nhiều nỗ lực tìm kiếm kèm theo phần thưởng lớn cho người tìm ra được một điểm khác biệt. Mọi tiên đoán đã biết phù hợp hoàn toàn với mọi thí nghiệm. Trong một số trường hợp đặc biệt, sự tương ứng giữa lý thuyết và thực nghiệm kéo dài hơn 13 chữ số. Nhưng điều thú vị hơn tính chính xác của QED là các tính chất mà Điện động lực học cổ điển không có. Ta hãy điểm nhanh qua các điều này.

Cảm nhận đầu tiên về phương trình Dirac

Lagrangian QED hàm ý rằng phương trình sóng của các điện tích trong một thế tuân theo phương trình Dirac:

$$i\hbar\gamma^{\mu}(\partial_{\mu} - ieA_{\mu})\psi = mc\psi \,. \qquad (108)$$

Dù có nhiều chỉ số nhưng ta chỉ cần nhớ là phương trình này chỉ đơn giản phát biểu rằng trị riêng của toán tử năng–động lượng bằng khối lượng nghỉ (x tốc độ ánh sáng c). Nói cách khác, phương trình phát biểu rằng sóng ψ chuyển động với vận tốc phase là c.

Hàm sóng ψ có 4 thành phần phức. Hai mô tả chuyển động của các hạt và hai mô tả chuyển động của các phản hạt. Mỗi loại hạt cần 2 thành phần phức vì phương trình mô tả spin và mật độ hạt. Spin là một chuyển động quay và chuyển động quay cần 3 tham số thực. Như vậy spin và mật độ cần 4 tham số thực; chúng có thể liên kết thành 2 số phức, hai cho hạt và hai cho phản hạt.

Mỗi thành phần của hàm sóng của một hạt quay tương đối tính sẽ tuân theo phương trình Schrödinger–Klein–Gordon tương đối tính. Điều này có nghĩa là mỗi thành phần sẽ tuân theo hệ thức năng–động lượng tương đối tính một cách riêng rẽ.

Câu đố 130 e

Hàm sóng tương đối tính ψ có một tính chất quan trọng là một phép quay một góc 2π sẽ làm nó đổi dấu. Chỉ có phép quay 4π không làm hàm sóng thay đổi. Đây là tính chất điển hình của các hạt có spin 1/2. Vì lý do này, hàm sóng 4 thành phần của một hạt có spin 1/2 được gọi là một *spinor*.

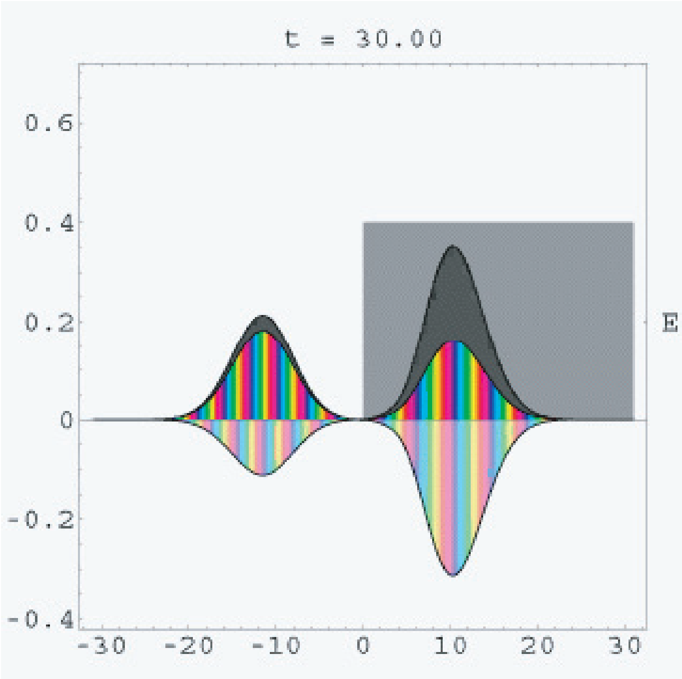
Phản vật chất

Hiện nay từ 'Phản vật chất' là một thuật ngữ quen thuộc. Điều thú vị là khái niệm này xuất hiện *trước khi* có các thí nghiệm chứng minh sự hiện hữu của nó. Biểu thức tương đối tính của năng lượng E của một electron điện tích e trong trường của một điện tích Q là

$$E + \frac{Qe}{4\pi\varepsilon_0 r} = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2} \,. \qquad (109)$$

Biểu thức này cũng cho phép có lời giải với năng lượng *âm* và điện tích $-e$, nếu ta sử dụng căn số âm. Thuyết lượng tử chứng tỏ đây là một tính chất tổng quát và các lời giải này tương ứng với *phản vật chất*.

Thật vậy, bạn đồng hành phản vật chất của electron đã được Paul Dirac tiên đoán trong những năm 1920s từ phương trình của ông (108), dựa trên hệ thức năng lượng



HÌNH 84 Nghịch lý Klein: chuyển động của một hàm sóng tương đối tính gặp một thế có độ dốc lớn. Một phần của hàm sóng được truyền qua; phần này là phản vật chất như thành phần bên dưới lớn hơn đã cho thấy. (QuickTime film © Bernd Thaller)

tương đối tính ở trên đây (109). Không hề biết về lời tiên đoán này, Carl Anderson đã phát hiện antielectron vào năm 1932 và gọi nó là *positron*. (Lẽ ra tên đúng nên là 'positon', không có 'r'. Dạng đúng này được sử dụng trong tiếng Pháp.) Lúc đó Anderson đang nghiên cứu về tia vũ trụ và nhận thấy một số 'electron' đã đi sai hướng trong từ trường của máy đo. Ông kiểm tra lại dụng cụ và sau cùng kết luận rằng ông đã tìm thấy một hạt có cùng khối lượng với electron nhưng mang điện tích dương.

Sự hiện hữu của positron có nhiều hệ quả kỳ lạ. Trong năm 1928, trước khi chúng được khám phá, lý thuyết gia Thuỵ Điển Oskar Klein đã chỉ ra là phương trình Dirac của electron đã tạo ra một tiên đoán kỳ dị: khi một electron chạm vào một tường thế có độ dốc đủ lớn, hệ số phản xạ lớn hơn 1. Như vậy tường sẽ phản xạ *nhiều hơn* phần nó nhận được. Ngoài ra, một phần lớn của hàm sóng được truyền xuyên qua tường. Năm 1935, sau khi phát hiện positron, Werner Heisenberg và Hans Euler đã giải thích được nghịch lý này. Họ nhận thấy rằng phương trình Dirac đã tiên đoán rằng khi điện trường vượt quá giá trị tới hạn

Xem 140

$$E_c = \frac{m_e c^2}{e\lambda_e} = \frac{m_e^2 c^3}{e\hbar} = 1.3\,\mathrm{EV/m}\ , \qquad (110)$$

thì chân không sẽ tự phát sinh các cặp electron–positron, sau đó sẽ được trường tách ra. Kết quả là trường ban đầu sẽ giảm đi. Hiện tượng này được gọi là *sự phân cực chân không* là nguyên do của việc hệ số phản xạ lớn hơn 1 mà Klein đã phát hiện. Thật vậy, thế dốc nhiều tương ứng với điện trường lớn.

Sự phân cực chân không chứng tỏ rằng khác với đời sống hằng ngày, *số* hạt trong thế giới vi mô không phải là một hằng số. Chỉ có *hiệu* giữa số hạt và số phản hạt được bảo toàn. Như vậy sự phân cực chân không giới hạn khả năng đếm số hạt trong thiên nhiên của chúng ta!

Sự phân cực chân không là một hiệu ứng yếu. Người ta chỉ quan sát được nó trong các va chạm của hạt có năng lượng lớn. Trong trường hợp đó, hiệu ứng làm tăng hằng số cấu trúc tinh tế! Sau đây ta sẽ mô tả các thí dụ về sự phân cực chân không thực sự khổng lồ đã được giả định là có mặt quanh các hố đen tích điện.

Quyển V, trang 153

Dĩ nhiên là sự phát sinh các cặp electron–positron không phải là một *sự sáng tạo* từ hư vô mà là một *sự biến đổi* năng lượng thành vật chất. Những quá trình như vậy là một phần của các mô tả tương đối tính về thiên nhiên. Điều không may là các vật lý gia có thói quen gọi phép biến đổi này là 'sự sinh cặp' và làm cho vấn đề bị rối loạn thêm một chút. Sự biến đổi này đã được Thuyết trường lượng tử mô tả và ta sẽ tìm hiểu nó trong quyển kế tiếp.

Các hạt ảo

Cho tới bây giờ, mặc dù đã có nhiều điều được bàn luận, việc tác dụng nhỏ hơn lượng tử tác dụng vẫn có vai trò quan trọng. Ta đã gặp một thí dụ: trong sự va chạm giữa 2 electron, có sự trao đổi các photon ảo. Ta đã biết rằng không thể quan sát được các photon ảo được trao đổi. Thật vậy, tác dụng S cho việc trao đổi này tuân theo hệ thức

Trang 65

$$S \leqslant \hbar \, . \tag{111}$$

Tóm lại, các hạt *ảo* chỉ xuất hiện như các hạt trung gian trong sự tương tác. Ta không thể quan sát được chúng. Các hạt ảo khác với các hạt thực thông thường, là không tuân theo hệ thức $E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$. Thí dụ như động năng có thể âm. Thật vậy, các hạt ảo ngược với các hạt thực 'tự do'. Ta có thể quan sát được chúng trong chân không nếu thời gian đo rất ngắn. Chúng có đời sống cực ngắn.

Các photon ảo là nguyên nhân gây ra tĩnh điện thế, từ trường, hiệu ứng Casimir, sự phát xạ tự phát, lực van der Waals và dịch chuyển Lamb trong nguyên tử. Việc nghiên cứu kỹ càng hơn chứng tỏ rằng trong mọi trường hợp có photon ảo thì dù xác suất có nhỏ thì vẫn có các electron và positron ảo xuất hiện.

Các hạt ảo có khối lượng đóng vai trò quan trọng trong sự phân cực chân không, số lượng giới hạn của các nguyên tố, bức xạ của hố đen và bức xạ Unruh. Các hạt ảo có khối lượng cũng đóng vai trò quan trọng trong tương tác mạnh, là lực liên kết các nucleon trong hạt nhân và trong tương tác yếu để giải thích cho hiện tượng phân rã beta và lý do Mặt trời chiếu sáng.

Đặc biệt, các cặp hạt–phản hạt ảo của vật chất và các hạt bức xạ ảo đã cùng nhau tạo thành *chân không*. Hơn nữa, các hạt bức xạ ảo cũng tạo thành các tĩnh trường. Ta cần các hạt ảo để mô tả đầy đủ tất cả các loại tương tác. Điều đặc biệt là các hạt ảo tham gia trong mọi quá trình phân rã.

Các câu đố vui và lạ về màu sắc và nguyên tử

Biển có phải là nơi xanh nhất không? Nước biển cũng giống như nước lọc, có màu xanh vì nó hấp thu ánh sáng đỏ và lục. Sự hấp thu bắt nguồn từ quang phổ đám dao động của

phân tử nước (là quang phổ phát sinh do sự tổng hợp của các chuyển động co giãn đối xứng và không đối xứng của phân tử). Sự hấp thu này yếu nhưng vẫn nhận ra được. Ở bước sóng 700 nm (đỏ), chiều dài hấp thu $1/e$ của nước là 1 m.
Xem 141

Nước biển cũng có thể có màu sáng nếu đáy biển phản xạ ánh sáng. Thêm vào đó, nước biển có thể có màu lục nếu nó chứa các hạt nhỏ tán xạ hay hấp thu ánh sáng xanh. Hay gặp nhất là trường hợp các hạt này là đất hay phiêu sinh vật. (Các vệ tinh có thể xác định loại phiêu sinh vật nhờ 'độ xanh' của biển.) Như vậy biển sẽ đặc biệt có màu xanh nếu nó sâu, tĩnh lặng và lạnh; trong trường hợp đó, đáy biển ở xa, đất không trộn lẫn với nước và ít phiêu sinh vật. Biển Sargasso sâu 5 km, tĩnh lặng và lạnh gần như suốt năm. Nó thường được coi là nơi *xanh nhất* của các vùng nước trên Trái đất.

Hồ cũng có thể xanh nếu chúng chứa các hạt khoáng chất nhỏ. Hạt tán xạ ánh sáng làm cho hồ có màu xanh với lý do tương tự màu xanh của bầu trời. Những hồ xanh như vậy có mặt ở nhiều nơi trên Trái đất.

* *

Về các phép đo quang phổ hydrogen có độ chính xác cao và hiện đại, hãy lắng nghe bậc thầy thực sự về lĩnh vực này: hãy thưởng thức bài nói chuyện năm 2012 của Theodor Hänsch, người đã dành gần trọn đời mình cho chủ đề này ở trang www.mediatheque.lindau-nobel.org.

* *

Nguyên tử hydrogen có nhiều tính chất hấp dẫn. Năm 2015, Friedmann và Hagen đã chứng tỏ rằng công thức nổi tiếng của $\pi = 3.14159265...$ có thể được rút ra từ quang phổ màu. Cơ lượng tử và màu sắc thực sự là các chủ đề hay và đẹp.
Xem 142

* *

Nếu các nguyên tử có các electron quỹ đạo, chuyển động quay của Trái đất, thông qua gia tốc Coriolis, sẽ tác dụng lên chuyển động của chúng và sẽ ảnh hưởng đến màu sắc của nguyên tử. Tiên đoán đẹp đẽ này là của Mark Silverman; hiệu ứng này rất nhỏ nên người ta chưa quan sát được.
Xem 136

* *

Ánh sáng bị các cách tử vật chất nhiễu xạ. Cách tử ánh sáng có thể nhiễu xạ vật chất không? Điều đáng ngạc nhiên là điều này có thể xảy ra được, như Dirac và Kapitza đã tiên đoán năm 1937. Nó đã được thực hiện lần đầu tiên năm 1986 bằng cách sử dụng các nguyên tử. Đối với electron tự do thì công phu hơn; sự khẳng định rõ ràng nhất diễn ra năm 2001, khi công nghệ laser mới đã được sử dụng để thực hiện một thí nghiệm đẹp mắt về các cực đại nhiễu xạ điển hình của các electron khi bị cách tử ánh sáng nhiễu xạ.
Xem 143

* *

Ánh sáng bị phản xạ toàn phần nếu nó được hướng vào một chất đậm đặc dưới một góc đủ lớn sao cho nó không thể đi vào chất đó. Một nhóm vật lý gia Nga đã chứng tỏ rằng nếu chất đó được kích thích, ta có thể *khuếch đại* cường độ của chùm ánh sáng phản xạ toàn phần. Chưa rõ là điều này đã được ứng dụng vào thực tế hay chưa.
Xem 136

* *

Cách mà người ta điều khiển các nguyên tử *đơn lẻ* bằng điện từ trường cho ta nhiều thí dụ hay về công nghệ ứng dụng hiện đại. Ngày nay người ta có thể nâng, bẫy, kích thích, chụp ảnh, khử kích thích và di chuyển các nguyên tử đơn lẻ chỉ bằng cách chiếu ánh sáng lên chúng. Năm 1997, giải Nobel vật lý đã được trao cho các nhà phát minh trong lĩnh vực này, Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji và William Philips.

Quyển I, trang 343
Xem 144

* *

Cho 2 gương và vài photon, người ta có thể bắt một nguyên tử và giữ nó lơ lửng giữa 2 gương. Kỳ công này, một trong nhiều cách để cô lập một nguyên tử, là bài thực hành chuẩn trong các phòng thí nghiệm. Bạn có thể tưởng tượng ra cách làm điều này không?

Xem 145
Câu đố 131 s

* *

Một thí dụ về các nghiên cứu thời hiện đại là nghiên cứu các nguyên tử *rỗng*, tức là các nguyên tử thiếu một số electron ở lớp trong. Chúng đã được J.P. Briand và cộng sự phát hiện năm 1990. Chúng xuất hiện khi một nguyên tử bị ion hoá hoàn toàn, tức là nguyên tử không có một electron nào, được cho tiếp xúc với kim loại. Các electron nhận được lúc đó sẽ chuyển động bên ngoài, để lại các lớp vỏ bên trong trống rỗng, khác hẳn một nguyên tử thông thường. Nguyên tử rỗng như vậy cũng có thể được tạo bằng cách chiếu xạ laser có cường độ lớn.

Xem 146

* *

Các hiệu ứng lượng tử tương đối tính có thể nhìn thấy bằng mắt thường. Hai hiệu ứng quan trọng nhất liên quan tới vàng và thuỷ ngân. Màu vàng của vàng – có nguyên tử số là 79 – bắt nguồn từ năng lượng chuyển mức giữa các electron 5d và 6s, sẽ hấp thu ánh sáng xanh. Không có hiệu ứng tương đối tính, sự chuyển mức này sẽ nằm trong vùng tử ngoại, tương tự sự chuyển mức giữa các electron 4d và 5s đối với bạc, và vàng sẽ không có màu. Màu vàng của vàng là một hiệu ứng tương đối tính.

Thuỷ ngân – nguyên tử số 80 – có vỏ 6s được lấp đầy. Do các hiệu ứng tương đối tính tương tự có trong vàng, các lớp vỏ này co lại và không tạo thành các liên kết. Vì lý do này, thuỷ ngân vẫn còn ở thể lỏng ở nhiệt độ phòng, khác với các kim loại khác. Như vậy Thuyết tương đối là nguyên do thuỷ ngân vẫn còn ở thể lỏng và nhờ đó nhiệt kế mới hoạt động được.

* *

Phosphor có tính lân quang không?

Câu đố 132 s

* *

Người ta có thể dò đường đi của một photon đơn lẻ khi đi qua một dụng cụ mà không hấp thu nó. Bạn có thể làm được điều này bằng cách nào?

Câu đố 133 ny

Các tính chất của vật liệu

Giống như kích thước của các nguyên tử hydrogen, kích thước của các nguyên tử khác cũng được lượng tử tác dụng quy định. Thật vậy, lượng tử tác dụng xác định độ lớn của các tương tác giữa các electron. Bằng cách đó lượng tử tác dụng xác định mọi tương tác

giữa các nguyên tử trong vật chất; do đó nó xác định tính chất của mọi vật liệu. Tính đàn hồi, tính dẻo, độ giòn, tính chất từ và điện của vật liệu đều được lượng tử tác dụng quy định. Nhờ $\hbar$ mới có môn Điện tử học! Ta sẽ xem một số thí dụ về tính chất của vật liệu trong quyển kế tiếp. Các chi tiết về mối liên hệ tổng quát giữa $\hbar$ và tính chất của vật liệu vẫn còn là một đề tài nghiên cứu mặc dù không có điều gì mâu thuẫn với lượng tử tác dụng. Nghiên cứu vật liệu là lĩnh vực nghiên cứu quan trọng nhất trong khoa học hiện đại và đã đạt được nhiều thành tựu nâng cao phẩm chất cuộc sống của chúng ta.

Tóm lại, Khoa học vật liệu đã khẳng định rằng Vật lý lượng tử cũng đã mô tả đúng mọi vật liệu; nó cũng khẳng định rằng mọi tính chất của vật liệu trong đời sống hằng ngày đều có nguồn gốc điện từ và bắt nguồn từ sự tương tác liên quan tới electron.

Một câu đố khó: cường độ của tương tác điện từ

Nhà vật lý vĩ đại Wolfgang Pauli quen nói rằng sau khi ông mất, điều đầu tiên mà ông sẽ hỏi thượng đế là giải thích hằng số cấu trúc tinh tế của Sommerfeld. (Các nhà vật lý khác cũng thường bình luận rằng sau khi nghe thượng đế giải thích điều đó, ông sẽ suy nghĩ một chút rồi 'phán' luôn: 'Sai!')

Hằng số cấu trúc tinh tế, do Arnold Sommerfeld đưa ra, là hằng số không thứ nguyên của thiên nhiên có giá trị đo được là

Xem 147

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137.035\,999\,679(94)} \approx 0.007\,297\,352\,5376(50)\ . \qquad (112)$$

Hằng số này xuất hiện lần đầu tiên để giải thích cho cấu trúc tinh tế của quang phổ nguyên tử; do đó nó mới mang cái tên kỳ lạ như vậy. Sommerfeld là người đầu tiên hiểu rõ tính quan trọng phổ quát của nó. Nó có vai trò quan trọng vì nhiều lý do.

Xem 148

Đầu tiên, hằng số này mô tả *cường độ* của tương tác điện từ. Số α là kết quả của sự tương tác giữa hai điện tích e. Lực Coulomb F giữa 2 electron là

$$F = \alpha\frac{\hbar c}{r^2} \qquad (113)$$

rõ ràng là hằng số này mô tả cường độ của tương tác điện từ. α lớn có nghĩa là hai vật mang điện tương tác với nhau mạnh hơn. Như vậy giá trị của α xác định kích thước của nguyên tử, kích thước của mọi vật cũng như mọi màu sắc trong thiên nhiên.

Thứ hai, chỉ vì α rất nhỏ nên ta mới có thể nói về các hạt. Thật vậy, vì hằng số này nhỏ hơn 1 nên ta có thể phân biệt các hạt với nhau. Nếu α gần bằng hay lớn hơn 1, các hạt sẽ tương tác với nhau mạnh đến nỗi ta không thể quan sát chúng một cách riêng rẽ hay nói về chúng.

Điều này dẫn tới lý do thứ ba giải thích cho sự quan trọng của hằng số cấu trúc tinh tế. Vì nó không có thứ nguyên nên ta chưa biết rõ cơ chế ấn định giá trị của nó. Tìm ra cơ chế này là một trong những thách thức còn lại trong cuộc thám hiểm của chúng ta. Khi ta chưa rõ cơ chế này – tính đến năm 2016 – thì ta chưa thể hiểu được về màu sắc và kích thước của một vật đơn giản quanh chúng ta!

Những thay đổi nhỏ trong cường độ lực hút điện từ giữa electron và proton sẽ tạo ra nhiều hệ quả rất quan trọng. Bạn có thể mô tả điều gì sẽ xảy ra cho kích thước của con

người, màu sắc của vật thể, màu sắc Mặt trời hay hoạt động của máy tính nếu cường độ tương tác tăng lên gấp đôi không? Và điều gì sẽ xảy ra khi nó giảm dần dần xuống còn phân nửa giá trị bình thường?

Câu đố 134 s

Từ những năm 1920s, việc giải thích giá trị của α đã được xem như một trong những thách thức khó khăn nhất mà vật lý hiện đại phải đương đầu. Đó là lý do giải thích cho câu chuyên tưởng tượng về Pauli. Năm 1946, trong bài phát biểu khi nhận giải Nobel, ông đã lặp lại rằng lý thuyết nào mà không xác định được hằng số này thì chưa trọn vẹn. Từ đó, các vật lý gia hình như chia làm hai nhóm: người không dám nhận thách thức và những người không có manh mối để tìm ra lời giải. Câu chuyện lôi cuốn này vẫn còn chờ chúng ta.

Xem 149

Bài toán hằng số cấu trúc tinh tế khó đến nỗi nó làm nhiều người lạc lối. Thí dụ như có người cho rằng ta không thể thay đổi các đơn vị vật lý sao cho $\hbar$, c và e đều bằng 1 vì như vậy sẽ làm cho $\alpha = 1/137.036...(1)$ thay đổi. Bạn có thể chứng minh lập luận này sai không?

Câu đố 135 s

Tóm tắt về màu sắc và vật chất

Tóm lại, lượng tử tác dụng $\hbar$ – cùng với sự tương tác giữa điện từ trường và các electron trong các nguyên tử, phân tử, chất lỏng hay chất rắn – xác định kích thước, hình dạng, màu sắc và tính chất của vật chất của mọi vật quanh ta. Lượng tử tác dụng xác định các tính chất cơ học như độ cứng hay độ đàn hồi, từ tính, nhiệt tính như nhiệt dung hay nhiệt ngưng tụ, quang tính như độ trong suốt và điện tính như vẻ sáng của kim loại. Hơn nữa, lượng tử tác dụng xác định mọi hoá tính và tính chất sinh học của vật chất. Mối liên hệ này là chủ đề của quyển kế tiếp.

Cường độ của tương tác điện từ được mô tả bằng hằng số cấu trúc tinh tế $\alpha \approx 1/137.036$. Tuy vậy người ta vẫn chưa giải thích được tại sao nó có giá trị như vậy.

Chương 9

Vật lý lượng tử giản lược

So với vật lý cổ điển, Thuyết lượng tử phức tạp hơn hẳn. Tuy vậy tư tưởng cơ bản thì đơn giản: trong thiên nhiên có một độ biến đổi nhỏ nhất hay một tác dụng cực tiểu có giá trị $\hbar = 1.1 \cdot 10^{-34}$ Js. Nói chính xác hơn, toàn bộ Thuyết lượng tử có thể tóm gọn trong một câu:

> ▹ Trong thiên nhiên, người ta không thể quan sát được các tác dụng hay biến đổi nhỏ hơn $\hbar = 1.054\,571\,800(13) \cdot 10^{-34}$ Js.

Giá trị tác dụng cực tiểu này, *lượng tử tác dụng*, dẫn tới những điều kỳ lạ quan sát được trong thế giới vi mô như tính chất sóng của vật chất, hệ thức bất định, sự mất điều hợp, sự ngẫu nhiên trong các phép đo, tính không phân biệt được, sự lượng tử hoá moment động lượng, hiệu ứng xuyên hầm, sự sinh cặp, sự phân rã và phản ứng của các hạt.

Bản chất của Thuyết lượng tử là không có sự biến đổi nhỏ vô hạn. Toán học của Thuyết lượng tử thì trừu tượng và rắc rối. Phần đi dạo này của chúng ta có đáng để nỗ lực không? Câu trả lời là có: các kết quả rất sâu sắc và độ chính xác của mô tả thì *hoàn hảo*. Trước tiên ta hãy cho một tổng quan về những kết quả này rồi hãy xét đến câu hỏi vẫn còn để mở đó.

Những kết quả về mặt vật lý của Thuyết lượng tử

Sự hiện hữu của lượng tử tác dụng trong thiên nhiên dẫn thẳng tới bài học chính mà ta đã nghiên cứu về chuyển động trong phần lượng tử của cuộc hành trình:

> ▹ Nếu nó chuyển động thì nó được tạo thành từ quanton hay các hạt lượng tử.

Mệnh đề này áp dụng cho mọi hệ vật lý, và như vậy, cho mọi vật và mọi hình ảnh, tức là cho toàn thể vật chất và bức xạ. Vật chuyển động được làm từ *quanton*. Đá, sóng nước, ánh sáng, sóng âm, động đất, gelatine và mọi vật mà ta có thể tương tác với chúng đều được tạo thành từ các hạt lượng tử.

Trong cuộc thám hiểm Thuyết tương đối ta đã khám phá ra là chân trời và chân không cũng có thể chuyển động. Nếu mọi thực thể chuyển động đều do các hạt lượng tử tạo thành thì ngụ ý trên về chân trời và chân không nói lên điều gì? Ta có thể cho rằng đối với chân trời thì không có vấn đề gì vì chỉ có một cách mô tả chân trời, đó là trạng thái cực hạn của vật chất. Nhưng đối với chân không thì không đơn giản như vậy; chúng sẽ

là chủ đề của phần cuối cuộc thám hiểm này.

Quyển II, trang 300
Quyển II, trang 321

Trước kia ta đã thắc mắc: vật chất, bức xạ và tương tác là gì? Bây giờ ta đã biết: chúng là các phức hợp của các hạt lượng tử sơ cấp. Đặc biệt, tương tác là sự trao đổi các hạt lượng tử sơ cấp.

Một *hạt lượng tử sơ cấp* là một thực thể đếm được, nhỏ hơn bước sóng Compton của chúng. Mọi hạt sơ cấp đều được mô tả bằng năng–động lượng, khối lượng, spin, số chẵn lẻ C, P và T. Tuy vậy, như ta sẽ thấy trong quyển kế tiếp, đây chưa phải là danh sách đầy đủ các tính chất của hạt. Về các tính chất *riêng* của các hạt lượng tử, tức là các tính chất không phụ thuộc quan sát viên, Thuyết lượng tử đã phát biểu một cách đơn giản:

Trang 129

▷ Trong thiên nhiên, mọi tính chất riêng của quanton hay các hạt lượng tử – với ngoại lệ của khối lượng – như spin, điện tích, cường tích, số chẵn lẻ v.v..., đều là bội nguyên của một đơn vị cơ bản. Vì mọi hệ vật lý đều gồm các quanton, trong các hệ phức hợp mọi tính chất riêng – với ngoại lệ của khối lượng* – đều có thể cộng hay nhân với nhau.

Tóm lại, mọi thực thể chuyển động do các hạt lượng tử tạo thành đều được mô tả bằng các tính chất riêng *rời rạc*. Để thấy rõ tính sâu sắc của kết quả này, bạn có thể áp dụng nó cho mọi vật chuyển động mà kết quả này thường bị quên như ma quái, linh hồn, thiên thần, mỹ thần, ma quỷ, ác quỷ, thần, nữ thần và linh hồn. Bạn có thể tự kiểm tra những điều xảy ra khi ta tính đến bản chất hạt của chúng.

Câu đố 136 e

“Deorum injuriae diis curae.**”
Tiberius, do Tacitus thuật lại.

Những kết quả về sự chuyển động của các hạt lượng tử

Quanton, hay hạt lượng tử, khác với các hạt thông thường: hạt lượng tử có thể *giao thoa*: chúng hành xử giống như một hoà trộn của hạt và sóng. Tính chất này được trực tiếp suy ra từ sự hiện hữu của $\hbar$, tác dụng khả hữu nhỏ nhất trong thiên nhiên. Từ sự hiện hữu của $\hbar$, Thuyết lượng tử suy ra mọi kết luận về chuyển động của hạt lượng tử. Ta hãy tóm lược những điểm chính.

Trong thiên nhiên *không có sự đứng yên*. Mọi vật đều tuân theo hệ thức bất định, tức là độ bất định của vị trí x và động lượng p nghiệm đúng hệ thức

$$\Delta x \Delta p \geqslant \hbar/2 \quad \text{với} \quad \hbar = 1.1 \cdot 10^{-34}\,\text{Js} \tag{114}$$

khẳng định việc không thể có sự đứng yên. Trạng thái của các hạt lượng tử được xác định bằng các biến động lực giống như trong vật lý cổ điển, kèm theo sự khác biệt là các biến động lực này không giao hoán. Vật lý cổ điển sẽ xuất hiện trở lại trong trường hợp giới hạn khi hằng số Planck $\hbar$ dần tới 0.

Thuyết lượng tử đưa *yếu tố xác suất* vào chuyển động. Xác suất là kết quả của lượng tử tác dụng thông qua sự tương tác với các nguồn nhiệt động lực - là một phần của môi

* Nói chính xác hơn, cùng với khối lượng, các góc cũng không bị lượng tử hoá. Các tính chất này sẽ được xác định trong quyển kế tiếp.
** ‘Sự xúc phạm của các vị thần chính là sự quan tâm của họ.’

trường của các hệ vật lý. Nói cách khác, xác suất là kết quả trong các thí nghiệm cố gắng gây ra một biến đổi nhỏ hơn lượng tử tác dụng.

Hạt lượng tử *hành xử giống như sóng*. Bước sóng de Broglie liên kết λ suy ra từ động lượng p theo công thức

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi\hbar}{p} \qquad (115)$$

trong cả hai trường hợp vật chất và bức xạ. Hệ thức này bắt nguồn từ tính chất sóng của ánh sáng và vật chất. Các hạt ánh sáng được gọi là photon; hiện nay việc quan sát các hạt này là bài thực hành tiêu chuẩn. Thuyết lượng tử cho rằng sóng hạt, giống như mọi sóng khác, có thể giao thoa, khúc xạ, tán sắc, tắt dần, bị tắt dần và bị phân cực. Điều này áp dụng cho photon, electron, nguyên tử và phân tử. Mọi sóng do các hạt lượng tử tạo thành, có thể được nhìn thấy, chạm vào và chuyển động. Ánh sáng có thể 'được nhìn thấy' qua sự tán xạ photon-photon có năng lượng lớn trong chân không; có thể được 'chạm vào' bằng cách sử dụng hiệu ứng Compton và có thể bị 'di chuyển' bằng sự uốn cong hấp dẫn. Các hạt vật chất, như phân tử hay nguyên tử, có thể được nhìn thấy trong kính hiển vi điện tử và có thể bị chạm vào hay di chuyển bằng kính hiển vi lực nguyên tử. Sự giao thoa và sự nhiễu xạ các hạt sóng được quan sát mỗi ngày trong kính hiển vi điện tử.

Ta có thể tưởng tượng sóng vật chất như những đám mây *quay địa phương*. Trong giới hạn có thể bỏ qua kích thước của đám mây, ta có thể xem các hạt lượng tử như các mũi tên nhỏ quay tròn. Nói cách khác, quanton có *phase*.

Các hạt *không thể đóng kín mãi.* Dù vật chất không thể xuyên qua, Thuyết lượng tử chứng tỏ rằng không có các hộp kín hay các vật cản không thể vượt qua. Sự đóng kín không có tính vĩnh cửu. Ta luôn luôn có thể vượt qua bất kỳ ranh giới nào nếu chờ đợi đủ lâu, vì có một xác suất hữu hạn để vượt qua bất kỳ vật cản nào. Quá trình này được gọi là *sự xuyên hầm* khi nhìn từ quan điểm không gian và được gọi là *sự phân rã* khi được nhìn từ quan điểm thời gian. Hiện tượng xuyên hầm giải thích cho sự hoạt động của đèn hình TV cũng như sự phân rã phóng xạ.

Mọi hạt và chùm hạt đều *có thể quay.* Hạt có moment động lượng riêng gọi là *spin*, xác định hành trạng của chúng khi chịu tác động của chuyển động quay. Boson có spin nguyên, fermion có spin bán nguyên. Một số chẵn các fermion liên kết hay một số bất kỳ các boson liên kết tạo ra một boson phức hợp; một số lẻ các fermion liên kết tạo ra một fermion có năng lượng nhỏ. Chất rắn thì bất khả xuyên thấu vì các electron trong các nguyên tử có tính chất của fermion.

Các hạt đồng nhất thì *không thể phân biệt được*. Bức xạ được tạo ra từ các hạt không phân biệt được gọi là boson, vật chất thì từ các fermion. Khi có sự trao đổi 2 fermion lúc tách rời kiểu không gian, hàm sóng đổi dấu, trong khi đối với 2 boson thì hàm sóng không thay đổi. Mọi tính chất khác của các hạt lượng tử thì giống như các hạt cổ điển, cụ thể là tính đếm được, sự tương tác, khối lượng, điện tích, moment động lượng, năng lượng, động lượng, vị trí, cũng như tính bất khả xuyên thấu của vật chất và tính xuyên thấu của bức xạ. Không có máy photocopy hoàn hảo.

Khi va chạm, *sự tương tác của hạt có tính địa phương*, thông qua sự trao đổi các hạt khác. Khi các hạt vật chất va chạm, chúng tương tác thông qua sự trao đổi các boson ảo, tức là các boson không thoả hệ thức năng-động lượng. Sự biến đổi chuyển động bắt nguồn từ sự trao đổi các hạt. Sự trao đổi các boson trung gian spin chẵn tạo ra tương tác

hút. Sự trao đổi các boson trung gian có spin lẻ tạo ra tương tác đẩy.

Tính chất của sự va chạm làm cho số hạt không bảo toàn. Trong khi va chạm, hạt có thể xuất hiện – nghĩa là được 'tạo ra' – hay biến đi – nghĩa là 'bị huỷ biến'. Điều này đúng cho cả boson lẫn fermion.

Tính chất của sự va chạm dẫn tới sự hiện hữu của *các phản hạt* mà người ta quan sát được trong các thí nghiệm. Các fermion sơ cấp, khác với boson sơ cấp, chỉ có thể sinh ra hoặc biến đi từng cặp. Các fermion sơ cấp có khối lượng và chuyển động chậm hơn ánh sáng.

Các hạt có thể *phân rã* và *bị biến đổi*. Nghiên cứu kỹ ta sẽ thấy rằng sự va chạm khiến cho các loại hạt không bảo toàn. Trong sự va chạm, các hạt được lựa chọn có thể thay đổi tính chất riêng của chúng. Điều này sẽ được nói rõ trong quyển kế tiếp. Nói cách khác, lượng tử tác dụng hàm ý rằng mọi vật sẽ *vỡ ra* và sinh vật sẽ *chết đi*.

Hình ảnh, do bức xạ tạo ra được mô tả bằng các biến động lực giống như vật chất: vị trí, phase, tốc độ, khối lượng, động lượng v.v... – mặc dù các giá trị và các mối liên hệ của chúng khác nhau. Hình ảnh chỉ có thể định xứ với một độ chính xác cỡ bước sóng λ của bức xạ sinh ra chúng.

Sự xuất hiện của hằng số Planck $\hbar$ hàm ý rằng có *các thang đo chiều dài* và *các thang đo thời gian* trong thiên nhiên. Thuyết lượng tử làm lung lay nhiều khái niệm về chuyển động. Không còn đại lượng nhỏ vô hạn. Về mặt này, sẽ có nhiều giới hạn dưới đối với các kích thước và các đại lượng đo được. Đặc biệt, Thuyết lượng tử chứng tỏ rằng không thể có chuyện các electron trong các vật nhỏ như nguyên tử có lối sống giống như loài người sống trên một Trái đất quay quanh Mặt trời. Thuyết lượng tử chứng tỏ rằng không thể có người Lilliput.

Đồng hồ và thước đo chiều dài có *độ chính xác hữu hạn*, do sự hiện hữu của lượng tử tác dụng và do sự tương tác với các nguồn nhiệt động lực. Mặt khác, mọi dụng cụ đo đều chứa các nguồn nhiệt động lực, vì nếu khác đi chúng không thể nào ghi được kết quả.

Xem 150
Trang 154

Các hiệu ứng lượng tử không có chỗ cho sự dung hợp lạnh, chiêm tinh học, sự viễn tải, sự viễn khiển, các hiện tượng siêu nhiên, sáng tạo từ hư vô, đa vũ trụ hay các hiện tượng nhanh hơn ánh sáng – không kể nghịch lý EPR.

Các thành tựu về độ đúng và độ chính xác

Không kể các thay đổi về mặt nhận thức, ngày nay Thuyết lượng tử đã cải thiện độ đúng của các tiên đoán từ một vài – nếu có – chữ số thường gặp trong Cơ học cổ điển tới nhiều chữ số – có lúc tới 13 – khi thực hiện phép đo. Độ chính xác bị giới hạn thường *không* do sự không đúng của lý thuyết mà do độ đúng của phép đo. Nói cách khác, sự phù hợp chỉ bị giới hạn bởi số tiền mà người thí nghiệm muốn chi. Bảng 8 cho thấy điều này rõ hơn.

BẢNG 8 Sự so sánh có chọn lọc giữa Vật lý cổ điển, Thuyết lượng tử và thực nghiệm.

Biến động lực	Tiên đoán cổ điển	Tiên đoán của Thuyết lượng tử [a]	Thực nghiệm	Chi phí ước tính
Chuyển động đơn giản của vật thể				
Độ bất định	0	$\Delta x \Delta p \geqslant \hbar/2$	$(1 \pm 10^{-2})\,\hbar/2$	10 k€

Biến động lực	Tiên đoán cổ điển	Tiên đoán của Thuyết lượng tử [a]	Thực nghiệm	Chi phí ước tính
Bước sóng của vật chất	không có	$\lambda p = 2\pi\hbar$	$(1 \pm 10^{-2})\,\hbar$	10 k€
Bước sóng Compton	không có	$\lambda_c = h/(m_e c)$	$(1 \pm 10^{-3})\,\lambda$	20 k€
Tốc độ Sinh cặp	0	σE	phù hợp	100 k€
Thời gian phân rã phóng xạ trong hydrogen	không có	$\tau \sim 1/n^3$	(1 ± 10^{-2})	5 k€
Moment động lượng nhỏ nhất	0	$\hbar/2$	$(1 \pm 10^{-6})\,\hbar/2$	10 k€
Hiệu ứng/áp suất Casimir	0	$p = (\pi^2\hbar c)/(240 r^4)$	(1 ± 10^{-3})	30 k€
Màu sắc của vật thể				
Quang phổ của vật nóng	phân kỳ	$\lambda_{max} = hc/(4.956\,kT)$	$(1 \pm 10^{-4})\ \Delta\lambda$	10 k€
Dịch chuyển Lamb	không có	$\Delta\lambda = 1057.86(1)$ MHz	$(1 \pm 10^{-6})\,\Delta\lambda$	50 k€
Hằng số Rydberg	không có	$R_\infty = m_e c\alpha^2/(2h)$	$(1 \pm 10^{-9})\,R_\infty$	50 k€
Hằng số Stefan–Boltzmann	không có	$\sigma = \pi^2 k^4/(60\hbar^3 c^2)$	$(1 \pm 3 \cdot 10^{-8})\,\sigma$	20 k€
Hằng số dịch chuyển Wien	không có	$b = \lambda_{max} T$	$(1 \pm 10^{-5})\,b$	20 k€
Chiết suất của nước	không có	1.34	trong phạm vi vài %	1 k€
Tán xạ photon-photon	0	từ QED: hữu hạn	phù hợp	50 M€
Tỷ số hồi chuyển từ của electron	1 hay 2	2.002 319 304 365(7)	2.002 319 304 361 53(53)	30 M€
Moment từ dị thường của Muon	0	$11\,659\,1827(63) \cdot 10^{-11}$	$11\,659\,2080(60) \cdot 10^{-11}$	100 M€
Tính chất của chất phức hợp				
Thời gian sống của nguyên tử	≈ 1 µs	∞	$> 10^{20}$ a	1 €
Sự tách vạch siêu tinh tế của Muonium	không có	4 463 302 542(620) Hz	4 463 302 765(53) Hz	1 M€
Kích thước và hình dạng phân tử	không có	từ QED	trong phạm vi 10^{-3}	20 k€

Trang 215

a. Mọi tiên đoán này đều được tính toán từ các hằng số vật lý cơ bản được cho trong Phụ lục 10.

Ta cũng lưu ý rằng các giá trị được tiên đoán *không khác* với các giá trị đo được. Nếu ta nhớ rằng vật lý cổ điển không cho phép ta tính bất kỳ một giá trị đo được nào thì ta mới thấy được sự thành công mà Thuyết lượng tử đã đạt được. Sự tiến bộ về mặt nhận thức này có được là do việc đưa ra khái niệm lượng tử tác dụng $\hbar$. Nói cách khác, ta có thể phát biểu: không có lượng tử tác dụng thì không thể mô tả thiên nhiên một cách đầy đủ.

Tóm lại, Thuyết lượng tử thì chính xác và đúng. Trong thế giới vi mô, Thuyết lượng tử phù hợp *một cách hoàn hảo* với thiên nhiên; bất chấp triển vọng nổi tiếng và giàu có hay số người nghiên cứu đông chưa từng có, người ta chưa gặp một sự mâu thuẫn nào giữa thực nghiệm và lý thuyết. Mặt khác, việc giải thích các giá trị đo được của hằng số

cấu trúc tinh tế $\alpha = 1/137.035\,999\,074(44)$, vẫn còn là một bài toán mở của tương tác điện từ.

Thuyết lượng tử có phải là ảo thuật không?

Nghiên cứu thiên nhiên cũng giống như việc học ảo thuật. Thiên nhiên thường có vẻ khác với bản chất của nó. Trong ảo thuật ta thường bị đánh lừa – nhưng chỉ khi ta quên các giới hạn riêng của mình. Một khi ta xem mình như một phần của trò chơi thì ta bắt đầu hiểu các mánh lới của nó. Đó là niềm vui của ảo thuật. Điều tương tự cũng xảy ra trong chuyển động lượng tử.

* *

Thiên nhiên hình như không có tính thuận nghịch, mặc dù nó có. Ta không bao giờ nhớ tương lai. Ta bị đánh lừa vì ta là vật vĩ mô.

* *

Thiên nhiên hình như mất điều hợp, mặc dù nó không mất. Ta lại bị đánh lừa vì ta là vật vĩ mô.

* *

Không có đồng hồ trong thiên nhiên. Ta bị đánh lừa vì ta luôn bị một số lớn các hạt bao quanh.

* *

Chuyển động hình như thường biến mất, mặc dù nó là vĩnh cữu. Ta lại bị đánh lừa vì giác quan của ta không thể cảm nhận được thế giới vi mô.

* *

Vật thể hình như không thể phân biệt được, mặc dù có thể phân biệt được chúng nhờ các tính chất thống kê. Ta bị đánh lừa vì đang sống ở các mức năng lượng nhỏ.

* *

Vật chất hình như liên tục, mặc dù không phải như vậy. Ta bị đánh lừa vì sự giới hạn của các giác quan.

* *

Chuyển động hình như có tính tất định theo nghĩa cổ điển, mặc dù nó có tính ngẫu nhiên. Ta lại bị đánh lừa vì ta là vật vĩ mô.

* *

Tóm lại, ta thường bị đánh lừa vì điều kiện ta đang có. Câu trả lời cho câu hỏi tiêu đề là: Vật lý cổ điển giống như ảo thuật và các mánh khoé đều bị Thuyết lượng tử phát hiện. Đó là tính hấp dẫn chủ yếu của nó.

Thuyết lượng tử chính xác nhưng nó còn có thể làm nhiều hơn nữa

Ta có thể tóm tắt phần này của cuộc phiêu lưu bằng một phát biểu đơn giản:

▷ Vật lý lượng tử là sự mô tả vật chất và bức xạ *mà không có* khái niệm nhỏ vô hạn.

Mọi biến đổi trong thiên nhiên đều được mô tả bằng các đại lượng *hữu hạn* và chủ yếu là bằng độ biến đổi khả hữu nhỏ nhất trong thiên nhiên, lượng tử tác dụng $\hbar = 1.054\,571\,800(13) \cdot 10^{-34}$ Js.

Mọi thí nghiệm, không có ngoại lệ, đều chứng tỏ rằng lượng tử tác dụng $\hbar$ là độ biến đổi nhỏ nhất mà ta có thể quan sát được. Như vậy sự mô tả thiên nhiên bằng lượng tử tác dụng thì *chính xác* và *có tính tối hậu*. Tác dụng có thể đo được nhỏ nhất $\hbar$, giống như tốc độ truyền năng lượng cực đại c, là một tính chất cơ bản của thiên nhiên. Người ta cũng có thể gọi cả hai là *các chân lý cơ bản*.

Vì ta có thể suy ra Thuyết lượng tử từ tác dụng đo được nhỏ nhất $\hbar$ một cách hợp lý và đầy đủ nên cách đơn giản nhất – và duy nhất – để bác bỏ nó là tìm ra một thí nghiệm mâu thuẫn với $\hbar$. Bạn hãy thử xem!

Câu đố 137 e

Mặc dù ta đã suy ra một tính chất cơ bản của thiên nhiên, nhưng nếu ta quay lại lúc bắt đầu tìm hiểu Thuyết lượng tử, ta vẫn không giấu được một sự bực mình nào đó. Ta đã biết rằng Vật lý cổ điển không thể giải thích được cuộc sống. Khi tìm kiếm kỹ càng về chuyển động vi mô, ta đã gặp nhiều điều thú vị đến nỗi ta vẫn *chưa* thành công trong việc giải thích cuộc sống. Thí dụ như ta đã biết điều gì đã xác định tốc độ electron trong nguyên tử nhưng ta vẫn chưa biết điều gì xác định tốc độ chạy của vận động viên. Đúng ra ta cũng chưa bàn luận về các tính chất của chất rắn và chất lỏng, và cũng gác lại những tính chất của các cấu trúc phức tạp hơn như sinh giới chẳng hạn.

Trang 15

Nói cách khác, sau phần giới thiệu Thuyết lượng tử này, ta vẫn còn phải kết nối các quá trình lượng tử với thế giới quen thuộc của chúng ta. Do đó, chủ đề của quyển kế tiếp sẽ là sự tìm hiểu về chuyển động bên trong sinh vật – bên trong các loại vật chất, từ chất rắn đến ngôi sao, bằng cách sử dụng lượng tử tác dụng làm nền tảng. Sau đó, ta sẽ thám hiểm chuyển động của không gian trống rỗng.

Phụ lục 10

Đơn vị, sự đo lường và các hằng số

Sự đo lường đồng nghĩa với việc so sánh các đại lượng cần đo với các chuẩn đo lường. Các chuẩn đo lường dựa trên các *đơn vị*. Nhiều hệ đơn vị khác nhau đã được sử dụng trên khắp thế giới. Phần lớn các chuẩn đo lường này được trao quyền cho một tổ chức phụ trách. Việc trao quyền này có khi bị lạm dụng và ngày nay việc này đã xảy ra, thí dụ như trong kỹ nghệ máy tính cũng như trong quá khứ xa xưa. Giải pháp cho cả hai trường hợp này thì giống nhau: tạo ra chuẩn đo lường có tính độc lập và toàn cầu. Đối với các đơn vị đo lường, việc này đã diễn ra vào thế kỷ 18: để tránh việc các tổ chức độc đoán lạm dụng, để loại bỏ các vấn đề các chuẩn đo lường khác nhau, thay đổi và không thể tái lập được, và – điều này không phải chuyện đùa – để đơn giản hoá việc thu thuế, tạo nên sự công bằng, một nhóm các khoa học gia, chính trị gia và kinh tế gia đồng ý tạo ra một bộ đơn vị. Nó được gọi là *Système International d'Unités*, Hệ đơn vị quốc tế, viết tắt là *SI*, và được xác định bởi một Hiệp ước quốc tế, 'Công ước về Mét'. Các đơn vị được bảo dưỡng bởi một tổ chức quốc tế, 'Đại hội đồng về cân đo', và các tổ chức con của nó, 'Uỷ ban quốc tế về cân đo' và 'Văn phòng quốc tế về cân đo' (BIPM). Tất cả đều được tổ chức trước Cách mạng Pháp.

Xem 368

Đơn vị SI

Tất cả các đơn vị SI đều được xây dựng từ 7 *đơn vị cơ bản*, có định nghĩa chính thức, được dịch từ tiếng Pháp sang tiếng Anh như dưới đây, cùng với ngày tháng định nghĩa:

- '*giây* là khoảng thời gian của 9 192 631 770 chu kỳ của bức xạ tương ứng với sự chuyển dời giữa hai mức siêu tinh tế của trạng thái cơ bản của nguyên tử caesium 133.' (1967) Định nghĩa 2019 thì tương đương nhưng ít rõ ràng hơn.*
- '*mét* là chiều dài của quãng đường trong chân không mà ánh sáng đi được trong khoảng thời gian 1/299 792 458 s.' (1983) Định nghĩa 2019 thì tương đương nhưng ít rõ ràng hơn.*
- '*kilogam*, ký hiệu kg, là đơn vị SI của khối lượng. Nó được định nghĩa bằng cách lấy trị số của hằng số Planck h bằng $6.626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ khi được biểu diễn theo đơn vị $J \cdot s$ hay $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$.' (2019)'*
- '*ampere*, ký hiệu A, là đơn vị SI của dòng điện. Nó được định nghĩa bằng cách lấy trị số của điện tích nguyên tố e bằng $1.602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ khi được biểu diễn theo đơn vị C hay $A \cdot s$.' (2019) * Định nghĩa này tương đương với: 1 ampere là $6.241\,509\,074... \cdot 10^{18}$ điện tích nguyên tố mỗi giây.
- '*kelvin*, ký hiệu K, là đơn vị SI của nhiệt độ nhiệt động lực. Nó được định nghĩa bằng cách lấy trị số của hằng số Boltzmann *k* bằng $1.380\,649 \cdot 10^{-23}$ khi được biểu diễn theo

đơn vị J/K.' (2019)*

▪ '*mole*, ký hiệu mol, là đơn vị SI của lượng chất. Một mol chứa đúng $6.022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ thực thể sơ cấp.' (2019)*

▪ '*candela* là cường độ sáng, theo hướng đã cho, của một nguồn phát ra bức xạ đơn sắc có tần số $540 \cdot 10^{12}$ hertz và có cường độ bức xạ theo hướng đó bằng (1/683) w/sr.' (1979) Định nghĩa 2019 thì tương đương nhưng ít rõ ràng hơn.*

Ta nên chú ý là cả hai đơn vị thời gian và chiều dài đều được định nghĩa như các tính chất nào đó của một mẫu tiêu chuẩn của chuyển động, cụ thể là ánh sáng. Đại hội đồng về cân đo cũng nhấn mạnh rằng việc quan sát chuyển động là một *điều kiện tiên quyết* để định nghĩa và xây dựng không gian và thời gian. *Chuyển động là cơ sở cho mọi quan sát và mọi phép đo.* Cũng cần nói thêm, việc sử dụng ánh sáng trong các định nghĩa đã được Jacques Babinet đề nghị vào năm 1827.**

Từ những đơn vị cơ bản này, tất cả các đơn vị khác được định nghĩa bằng các phép nhân và chia. Như vậy tất cả các đơn vị SI đều có các tính chất sau đây:

▪ Các đơn vị SI tạo thành một hệ đơn vị có *độ chính xác cao nhất*: tất cả các đơn vị được định nghĩa với độ chính xác cao hơn độ chính xác của các phép đo thường dùng. Hơn nữa, độ chính xác của các định nghĩa được cải tiến thường xuyên. Sai số tương đối hiện nay của định nghĩa của giây vào khoảng 10^{-14}, của met vào khoảng 10^{-10}, của kilogam vào khoảng 10^{-9}, của ampere là 10^{-7}, của mole ít hơn 10^{-6}, của kelvin là 10^{-6} và của candela là 10^{-3}.

▪ Các đơn vị SI tạo thành một hệ đơn vị *tuyệt đối*: mọi đơn vị đều được định nghĩa sao cho người ta có thể tái lập chúng trong những phòng thí nghiệm được trang bị thích hợp, một cách độc lập, với độ chính xác cao. Điều này nhằm loại trừ tối đa các sai sót hay lạm dụng của các tổ chức định chuẩn. Đúng ra đơn vị SI hiện nay rất gần với các đơn vị tự nhiên của Planck mà ta sẽ trình bày sau đây. Trong thực tế, SI hiện nay là một tiêu chuẩn quốc tế dùng để xác định trị số của 7 hằng số $\Delta\nu_{Cs}$, c, $\hbar$, e, k, N_A và K_{cd}. Sau hơn 200 năm bàn bạc, CGPM còn rất ít việc để làm.

▪ Các đơn vị SI tạo thành một hệ đơn vị *thực tế*: các đơn vị cơ bản là các đại lượng có kích thước thông thường. Các đơn vị thường dùng có tên và cách viết tắt tiêu chuẩn. Danh sách đầy đủ chỉ bao gồm 7 đơn vị cơ bản, các đơn vị phụ, các đơn vị dẫn xuất và các đơn vị được thêm vào.

Có hai đơn vị SI *phụ*: đơn vị đo góc (phẳng), được định nghĩa là tỷ số của chiều dài cung/bán kính, gọi là *radian* (rad). Góc khối được định nghĩa là tỷ số diện tích đối diện/bình phương bán kính, gọi là *steradian* (sr).

Các đơn vị *dẫn xuất* có tên riêng chính thức bằng tiếng Anh, không viết hoa và dấu nhấn, là:

* Ký hiệu của 7 đơn vị là s, m, kg, A, K, mol và cd. Định nghĩa chính thức có đầy đủ ở địa chỉ www.bipm.org. Để biết thêm chi tiết về các mức năng lượng của nguyên tử caesium, hãy tham khảo một quyển sách về vật lý nguyên tử. Thang đo nhiệt độ Celsius θ được định nghĩa như sau: $\theta/°C = T/K - 273.15$; hãy để ý có một sai biệt nhỏ với con số xuất hiện trong định nghĩa của kelvin. Trong định nghĩa của candela, tần số ánh sáng tương ứng với 555.5 nm, tức là màu lục, là bước sóng nhạy nhất đối với mắt.

Xem 152

** Jacques Babinet (1794–1874), vật lý gia Pháp, người đã công bố các công trình quang học quan trọng.

Tên	Viết tắt
hertz	$Hz = 1/s$
pascal	$Pa = N/m^2 = kg/(m\,s^2)$
watt	$W = kg\,m^2/s^3$
volt	$V = kg\,m^2/(As^3)$
ohm	$\Omega = V/A = kg\,m^2/(A^2s^3)$
weber	$Wb = Vs = kg\,m^2/(As^2)$
henry	$H = Vs/A = kg\,m^2/(A^2s^2)$
lumen	$lm = cd\,sr$
becquerel	$Bq = 1/s$
sievert	$Sv = J/kg = m^2/s^2$

Tên	Viết tắt
newton	$N = kg\,m/s^2$
joule	$J = Nm = kg\,m^2/s^2$
coulomb	$C = As$
farad	$F = As/V = A^2s^4/(kg\,m^2)$
siemens	$S = 1/\Omega$
tesla	$T = Wb/m^2 = kg/(As^2) = kg/(Cs)$
độ Celsius	°C (xem định nghĩa của kelvin)
lux	$lx = lm/m^2 = cd\,sr/m^2$
gray	$Gy = J/kg = m^2/s^2$
katal	$kat = mol/s$

Ta cần chú ý là trong tất cả các định nghĩa đơn vị, kilogram chỉ xuất hiện với luỹ thừa 1, 0 và −1. Bạn có thể tìm ra lý do không?

Câu đố 138 s

Các đơn vị không thuộc SI *được thêm vào* là *phút*, *giờ*, *ngày* (đối với thời gian), *độ* $1° = \pi/180\,rad$, *phút* $1' = \pi/10\,800\,rad$, *giây* $1'' = \pi/648\,000\,rad$ (đối với góc), *lít*, và *tấn*. Các đơn vị khác đều bị tránh không sử dụng.

Người ta làm tăng thêm tính thực tế cho tất cả các đơn vị SI bằng cách đưa ra thêm các tên và cách viết tắt tiêu chuẩn của các luỹ thừa của 10, mà ta gọi là *các tiền tố*:*

Tên luỹ thừa		
10^1	deca	da
10^2	hecto	h
10^3	kilo	k
10^6	Mega	M
10^9	Giga	G
10^{12}	Tera	T
10^{15}	Peta	P

Tên luỹ thừa		
10^{-1}	deci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	µ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f

Tên luỹ thừa		
10^{18}	Exa	E
10^{21}	Zetta	Z
10^{24}	Yotta	Y
không chính thức:		
10^{27}	Xenta	X
10^{30}	Wekta	W
10^{33}	Vendekta	V
10^{36}	Udekta	U

Tên luỹ thừa		
10^{-18}	atto	a
10^{-21}	zepto	z
10^{-24}	yocto	y
Xem 153		
10^{-27}	xenno	x
10^{-30}	weko	w
10^{-33}	vendeko	v
10^{-36}	udeko	u

▪ Các đơn vị SI tạo thành một hệ đơn vị *đầy đủ*: chúng bao gồm một cách có hệ thống tất cả các biến động lực trong vật lý. Thêm nữa, chúng còn điều chỉnh luôn các đơn vị đo lường cho tất cả các khoa học khác.

* Người ta đã sáng chế ra một số tên (yocto nghe giống như từ Latin *octo* 'tám', zepto nghe giống như từ Latin *septem*, yotta và zetta thì tương tự, exa và peta nghe giống như từ Hy Lạp ἑξάκις và πεντάκις là '6 lần' và '5 lần', các tên không chính thức nghe giống như các từ Hy Lạp có nghĩa là 9, 10, 11 và 12); một số tên là từ tiếng Đan Mạch/Na Uy (atto do *atten* '18', femto do *femten* '15'); một số tên là từ tiếng Latin (*mille* là '1000', *centum* là '100', *decem* là '10', *nanus* là 'lùn'); một số tên là từ tiếng Ý (*piccolo* là 'nhỏ'); một số tên là từ tiếng Hy Lạp (micro do μικρός là 'nhỏ', deca/deka do δέκα là '10', hecto do ἑκατόν là '100', kilo do χίλιοι là '1000', mega do μέγας là 'lớn', giga doγίγας là 'khổng lồ', tera do τέρας là 'quái vật').

Hãy dịch câu: Tôi đã bị kẹt xe mất một micro-thế kỷ để đi một quãng đường một picoparsec và tốn hết 2/10 milimét vuông nhiên liệu.

Câu đố 139 e

▪ Các đơn vị SI tạo thành một hệ đơn vị *phổ dụng*: chúng còn được sử dụng trong lĩnh vực thương mại, kỹ nghệ, giáo dục, nghiên cứu và trong gia đình. Chúng còn có thể được các nền văn minh ngoài Trái đất, nếu có, sử dụng.

▪ Các đơn vị SI tạo thành một hệ đơn vị *nhất quán*: tích hay thương của 2 đơn vị SI cũng là một đơn vị SI. Về nguyên tắc điều này có nghĩa là có thể dùng cùng một chữ viết tắt 'SI' cho mọi đơn vị.

Các đơn vị SI không phải là tập hợp khả hữu duy nhất có thể thoả mãn các yêu cầu trên nhưng chúng là hệ đơn vị đang có, duy nhất làm được điều đó.*

Ý nghĩa của phép đo

Câu đố 140 e

Mỗi phép đo là một sự so sánh với một chuẩn đo. Do đó, một phép đo bất kỳ đòi hỏi có *vật chất* để hiện thực hoá chuẩn đo (ngay cả chuẩn vận tốc), và *bức xạ* để hoàn thành việc so sánh. Như vậy khái niệm đo đã giả sử rằng phải có vật chất và bức xạ và chúng phải tách biệt nhau.

Mỗi phép đo là một sự so sánh. Như vậy đo bao hàm việc phải có không gian và thời gian và chúng phải khác nhau.

Mỗi phép đo sinh ra một kết quả đo. Do đó mỗi phép đo phải có *nơi lưu trữ* kết quả. Như vậy quá trình đo dẫn tới sự phân biệt trạng thái trước và sau khi đo. Nói cách khác, mỗi phép đo là một quá trình *bất thuận nghịch*.

Mỗi phép đo là một quá trình chiếm một lượng thời gian và không gian nào đó.

Các tính chất này tuy đơn giản nhưng quan trọng. Hãy coi chừng xem có ai phủ nhận chúng hay không.

Đơn vị tự nhiên của Planck

Vì dạng chính xác của nhiều phương trình phụ thuộc hệ đơn vị được sử dụng, các nhà vật lý lý thuyết thường sử dụng các hệ đơn vị được tối ưu hoá cho việc tạo ra các phương trình đơn giản. Các đơn vị được chọn và giá trị của các hằng số trong tự nhiên có liên hệ với nhau. Trong vật lý vi mô, người ta thường sử dụng *hệ đơn vị tự nhiên của Planck*. Chúng được định nghĩa bằng cách đặt $c = 1, \hbar = 1, G = 1, k = 1, \varepsilon_0 = 1/(4\pi)$ và $\mu_0 = 4\pi$. Như vậy các đơn vị của Planck được định nghĩa từ các tổ hợp của các hằng số cơ bản; sự tương ứng của các đơn vị đó với các đơn vị cơ bản SI được cho trong Bảng 10.** Bảng này cũng hữu ích cho việc chuyển đổi các phương trình được viết theo các đơn vị tự nhiên trở lại dạng theo đơn vị SI: chỉ cần thay thế mỗi đại lượng X bằng X/X_{Pl}.

* Ngoài các đơn vị quốc tế, cũng có các đơn vị mang tính *địa phương*. Phần lớn các đơn vị địa phương, vẫn còn được sử dụng, có nguồn gốc La Mã. Dặm xuất phát từ *milia passum*, thường là 1000 bước (đôi) dài khoảng 1480 mm mỗi bước; ngày nay một hải lý, đã từng được định nghĩa là 1 phút cung trên Mặt đất, có chiều dài chính xác là 1852 m. Inch xuất phát từ *uncia/onzia* (1/12 của một foot). Pound (xuất phát từ *pondere* 'cân') được dịch từ *libra* – cái cân – cũng là nguồn gốc của chữ viết tắt lb. Ngay cả thói quen đếm từng tá thay vì chục cũng có nguồn gốc La Mã. Những đơn vị này và các đơn vị buồn cười khác – như hệ đơn vị mà tên các đơn vị đều bắt đầu bằng chữ 'f', và hệ dùng furlong/fortnight làm đơn vị vận tốc – bây giờ đã chính thức được định nghĩa là bội số của đơn vị SI.

** Các đơn vị tự nhiên x_{Pl} được cho ở đây mà ngày nay thường được sử dụng, là các đơn vị được định nghĩa bằng cách sử dụng hằng số $\hbar$ và, như Planck đã làm lúc ban đầu, sử dụng hằng số $h = 2\pi\hbar$. Các đơn vị điện từ cũng có thể được định nghĩa bằng các hệ số khác hơn $4\pi\varepsilon_0$ trong các biểu thức: thí dụ như sử dụng $4\pi\varepsilon_0\alpha$, với *hằng số cấu trúc tinh tế* α, sẽ cho $q_{\text{Pl}} = e$. Để giải thích cho các con số giữa các dấu ngoặc, hãy xem dưới đây.

Trang 197

BẢNG 10 Các đơn vị tự nhiên của Planck (chưa hiệu chỉnh).

Tên	Định nghĩa				Giá trị
Các đơn vị cơ bản					
Chiều dài Planck	l_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar G/c^3}$	=	$1.616\,0(12) \cdot 10^{-35}$ m
Thời gian Planck	t_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar G/c^5}$	=	$5.390\,6(40) \cdot 10^{-44}$ s
Khối lượng Planck	m_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c/G}$	=	21.767(16) µg
Cường độ Planck	I_{Pl}	=	$\sqrt{4\pi\varepsilon_0 c^6/G}$	=	$3.479\,3(22) \cdot 10^{25}$ A
Nhiệt độ Planck	T_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c^5/(Gk^2)}$	=	$1.417\,1(91) \cdot 10^{32}$ K
Các đơn vị không quan trọng					
Vận tốc Planck	v_{Pl}	=	c	=	0.3 Gm/s
Moment động lượng Planck	L_{Pl}	=	$\hbar$	=	$1.1 \cdot 10^{-34}$ Js
Tác dụng Planck	S_{aPl}	=	$\hbar$	=	$1.1 \cdot 10^{-34}$ Js
Entropy Planck	S_{ePl}	=	k	=	13.8 yJ/K
Các đơn vị hợp thành					
Mật độ khối lượng Planck	ρ_{Pl}	=	$c^5/(G^2\hbar)$	=	$5.2 \cdot 10^{96}$ kg/m^3
Năng lượng Planck	E_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c^5/G}$	=	2.0 GJ = $1.2 \cdot 10^{28}$ eV
Động lượng Planck	p_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c^3/G}$	=	6.5 Ns
Công suất Planck	P_{Pl}	=	c^5/G	=	$3.6 \cdot 10^{52}$ W
Lực Planck	F_{Pl}	=	c^4/G	=	$1.2 \cdot 10^{44}$ N
Áp suất Planck	p_{Pl}	=	$c^7/(G\hbar)$	=	$4.6 \cdot 10^{113}$ Pa
Gia tốc Planck	a_{Pl}	=	$\sqrt{c^7/(\hbar G)}$	=	$5.6 \cdot 10^{51}$ m/s^2
Tần số Planck	f_{Pl}	=	$\sqrt{c^5/(\hbar G)}$	=	$1.9 \cdot 10^{43}$ Hz
Điện tích Planck	q_{Pl}	=	$\sqrt{4\pi\varepsilon_0 c\hbar}$	=	1.9 aC = 11.7 e
Điện áp Planck	U_{Pl}	=	$\sqrt{c^4/(4\pi\varepsilon_0 G)}$	=	$1.0 \cdot 10^{27}$ V
Điện trở Planck	R_{Pl}	=	$1/(4\pi\varepsilon_0 c)$	=	30.0 Ω
Điện dung Planck	C_{Pl}	=	$4\pi\varepsilon_0 \sqrt{\hbar G/c^3}$	=	$1.8 \cdot 10^{-45}$ F
Độ tự cảm Planck	L_{Pl}	=	$1/(4\pi\varepsilon_0)\sqrt{\hbar G/c^7}$	=	$1.6 \cdot 10^{-42}$ H
Điện trường Planck	E_{Pl}	=	$\sqrt{c^7/(4\pi\varepsilon_0 \hbar G^2)}$	=	$6.5 \cdot 10^{61}$ V/m
Mật độ từ thông Planck	B_{Pl}	=	$\sqrt{c^5/(4\pi\varepsilon_0 \hbar G^2)}$	=	$2.2 \cdot 10^{53}$ T

Các đơn vị tự nhiên còn quan trọng vì lý do khác: khi một đại lượng được gọi một cách tuỳ tiện là 'vô cùng nhỏ (hay lớn)', thì cách phát biểu đúng là 'nhỏ (hay lớn) như đơn vị Planck có hiệu chỉnh tương ứng'. Như đã giải thích trong sách và đặc biệt là trong phần cuối, không thể gọi thay thế như vậy vì hầu như mọi đơn vị Planck đều cung cấp, trong phạm vi một hệ số hiệu chỉnh bậc 1, một cực trị cho biến động lực tương ứng – một số giới hạn trên và một số giới hạn dưới. Điều không may là các hệ số này chưa được nhiều người biết đến. Ta có thể kiếm được cực trị chính xác cho mỗi biến động lực trong thiên

Quyển VI, trang 37

nhiên khi G được thay thế bằng $4G$ và $4\pi\varepsilon_0$ thay bằng $4\pi\varepsilon_0\alpha$ trong tất cả các đại lượng Planck. Những cực trị này, hay *những đơn vị Planck được hiệu chỉnh*, là những *đơn vị tự nhiên thực sự*. Chỉ có một số đại lượng quảng tính mới có thể vượt qua những cực trị này. (Bạn có thể tìm ra chúng không?)

Câu đố 141 s

Các hệ đơn vị khác

Một mục tiêu nghiên cứu quan trọng trong Vật lý năng lượng cao là tính toán cường độ của mọi tương tác; do đó việc cho hằng số hấp dẫn G bằng đơn vị như trong hệ đơn vị Planck là điều không thực tiễn. Vì lý do này, các nhà vật lý năng lượng cao thường đặt $c = \hbar = k = 1$ và $\mu_0 = 1/\varepsilon_0 = 4\pi$,* và để lại hằng số hấp dẫn G trong các phương trình.

Trong hệ đơn vị này chỉ có một đơn vị cơ bản nhưng ta được tự do lựa chọn. Thường chiều dài chuẩn được chọn làm đơn vị cơ bản, là nguyên mẫu của đại lượng được đo. Các biến động lực vật lý quan trọng nhất liên hệ với nhau như sau

$$\begin{aligned} 1/[l^2] &= [E]^2 = [F] = [B] = [E_{\text{electric}}] , \\ 1/[l] &= [E] = [m] = [p] = [a] = [f] = [I] = [U] = [T] , \\ 1 &= [v] = [q] = [e] = [R] = [S_{\text{action}}] = [S_{\text{entropy}}] = \hbar = c = k = [\alpha] , \\ [l] &= 1/[E] = [t] = [C] = [L] \quad \text{và} \\ [l]^2 &= 1/[E]^2 = [G] = [P] \end{aligned} \tag{116}$$

trong đó $[x]$ là đơn vị của đại lượng x. Sử dụng cùng một đơn vị cho thời gian, điện dung và tự cảm thì không hợp khẩu vị của mọi người nên các nhà điện học không sử dụng hệ đơn vị này.**

Thường thường để gây ấn tượng về năng lượng cần để quan sát một hiệu ứng đang nghiên cứu, một năng lượng chuẩn được chọn làm đơn vị cơ bản. Trong vật lý hạt, đơn vị năng lượng phổ biến nhất là *electron volt* eV, được định nghĩa là động năng mà một electron có được khi được gia tốc dưới hiệu điện thế 1 volt (có lẽ tên ‘proton volt’ tốt hơn). Do đó ta có $1\,\text{eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}\,\text{J}$, hay

$$1\,\text{eV} \approx \tfrac{1}{6}\,\text{aJ} \tag{117}$$

thì dễ nhớ hơn. Sự đơn giản hoá $c = \hbar = 1$ cho kết quả là $G = 6.9 \cdot 10^{-57}\,\text{eV}^{-2}$ và cho phép ta sử dụng đơn vị eV cho khối lượng, động lượng, nhiệt độ, tần số, thời gian và chiều dài, với sự tương ứng của từng đơn vị là $1\,\text{eV} \equiv 1.8 \cdot 10^{-36}\,\text{kg} \equiv 5.4 \cdot 10^{-28}\,\text{Ns} \equiv 242\,\text{THz} \equiv 11.6\,\text{kK}$ và $1\,\text{eV}^{-1} \equiv 4.1\,\text{fs} \equiv 1.2\,\mu\text{m}$.

Câu đố 142 e

* Các định nghĩa khác của các hằng số tỷ lệ trong Điện động lực học dẫn tới hệ đơn vị Gauss thường được sử dụng trong các tính toán lý thuyết, hệ đơn vị Heaviside–Lorentz, hệ đơn vị tĩnh điện và hệ đơn vị điện từ.

Xem 154

** Trong danh sách này, l là chiều dài, E là năng lượng, F là lực, E_{electric} là điện trường và B là từ trường, m là khối lượng, p là động lượng, a là gia tốc, f là tần số, I là cường độ dòng điện, U là hiệu thế, T là nhiệt độ, v là tốc độ, q là điện tích, R là điện trở, P là công suất, G là hằng số hấp dẫn.

Trang web www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/general/units_en.html cung cấp một công cụ để chuyển đổi đơn vị.

Các nhà nghiên cứu Thuyết tương đối tổng quát thường sử dụng hệ đơn vị khác, trong đó *bán kính Schwarzschild* $r_s = 2Gm/c^2$ được sử dụng để đo khối lượng bằng cách đặt $c = G = 1$. Trong trường hợp này, khối lượng và chiều dài có *cùng* thứ nguyên và $\hbar$ có thứ nguyên của diện tích.

Để có một cảm nhận về đơn vị eV, các hệ thức sau đây khá hữu dụng. Nhiệt độ phòng, thường được lấy là 20°C hay 293 K, tương ứng với động năng của mỗi hạt là 0.025 eV hay 4.0 zJ. Năng lượng lớn nhất của hạt đo được cho đến nay thuộc về tia vũ trụ có năng lượng $3 \cdot 10^{20}$ eV hay 48 J. Dưới mặt đất, người ta đã xây dựng được một máy gia tốc có thể tạo ra năng lượng khoảng 105 GeV hay 17 nJ cho electron và antielectron và một máy khác có thể tạo ra năng lượng 14 TeV hay 2.2 µJ cho proton sắp được xây dựng xong. Cả 2 máy đều thuộc về CERN ở Geneva và có chu vi 27 km. Xem 155

Cho đến nay nhiệt độ thấp nhất mà ta đã đo được là 280 pK, trong một nhóm các hạt nhân rhodium được giữ trong một hệ làm lạnh đặc biệt. Bên trong của máy làm lạnh đó có thể là điểm lạnh nhất trong toàn thể vũ trụ. Động năng của mỗi hạt tương ứng với nhiệt độ đó cũng là giá trị nhỏ nhất mà người ta đã từng đo được: nó tương ứng với 24 feV hay 3.8 vJ = $3.8 \cdot 10^{-33}$ J. Đối với các hạt cô lập, kỷ lục hình như thuộc về neutron: người ta đã đạt tới động năng nhỏ đến 10^{-7} eV, tương ứng với bước sóng de Broglie 60 nm. Xem 156

Các câu đố vui và lạ về đơn vị

Chiều dài Planck gần bằng bước sóng de Broglie $\lambda_B = h/mv$ của một người thả bộ trên đường (m = 80 kg, v = 0.5 m/s); do đó chuyển động này nhanh chóng được gọi là 'Cuộc đi dạo của Planck.' Xem 157

* *

Khối lượng Planck bằng khối lượng của khoảng 10^{19} proton. Khối lượng này gần bằng khối lượng của thai nhi khoảng 10 ngày tuổi.

* *

Những đại lượng được đo chính xác nhất trong thiên nhiên là tần số của các pulsar millisecond, tần số của vạch chuyển mức hẹp của một số nguyên tử và hằng số Rydberg của *nguyên tử* hydrogen, tất cả đều được đo với độ chính xác như trong định nghĩa của giây. Sự chuyển mức của caesium dùng để định nghĩa giây có một bề rộng hữu hạn làm giới hạn độ chính xác: giới hạn này có khoảng 14 chữ số. Xem 158

* *

Đồng hồ chính xác nhất mà người ta đã từng tạo ra, sử dụng vi ba, có độ ổn định 10^{-16} trong thời gian chạy là 500 s. Đối với khoảng thời gian dài hơn, kỷ lục năm 1997 cỡ 10^{-15}; nhưng các giá trị khoảng 10^{-17} nằm trong khả năng của công nghệ. Độ chính xác của đồng hồ bị giới hạn vì nhiễu nếu thời gian đo ngắn và vì sự kéo theo nếu thời gian đo dài, tức là do các tác dụng của hệ thống. Vùng ổn định cao nhất phụ thuộc loại đồng hồ; thường là trong khoảng 1 ms đối với đồng hồ quang và 5000 s đối với maser. Pulsar là loại đồng hồ duy nhất mà ta chưa biết vùng ổn định của nó; nó đã nằm đó hơn 20 năm, là thời gian kể từ lúc phát hiện đến khi các dòng này được viết ra. Xem 159 Xem 160

* *

Thời gian ngắn nhất mà người ta đã đo được là thời gian sống của các hạt 'sơ cấp'. Đặc biệt, người ta đã đo được thời gian sống của D mesons là nhỏ hơn 10^{-23} s. Những thời gian như vậy được đo bằng cách sử dụng một buồng bọt, nơi người ta ghi lại ảnh của vết Xem 161

Câu đố 143 s đường đi. Bạn có thể ước lượng các đoạn đường này dài bao nhiêu không? (Đây là câu hỏi mẹo – nếu chiều dài mà bạn tìm ra không thể quan sát được bằng một kính hiển vi, bạn đã sai lầm trong việc tính toán.)

* *

Thời gian dài nhất mà ta đã gặp trong thiên nhiên là thời gian sống của đồng vị phóng xạ nào đó, trên 10^{15} năm và giới hạn dưới của sự phân rã proton là trên 10^{32} năm. Những thời gian này lớn hơn tuổi của vũ trụ rất nhiều, mà người ta đã ước tính là 14 ngàn triệu năm. Xem 162

* *

Độ biến thiên của các đại lượng thường dễ đo hơn là việc đo chính giá trị của chúng. Thí dụ như trong máy phát hiện sóng hấp dẫn, độ nhạy đạt được trong năm 1992 là $\Delta l/l = 3 \cdot 10^{-19}$ đối với các chiều dài có bậc cỡ 1 m. Xem 163 Nói cách khác, đối với một khối kim loại cỡ 1 mét khối, người ta có thể đo được độ biến thiên chiều dài khoảng 3000 lần nhỏ hơn bán kính proton. Các bộ dụng cụ này bây giờ đã bị thay thế bởi các giao thoa kế vòng. Người ta đã xây dựng các giao thoa kế vòng này để đo sự sai biệt về tần số cỡ 10^{-21} và chúng vẫn còn được phát triển. Xem 164

Độ chính xác và độ đúng của các phép đo

Đo lường là nền tảng của vật lý. Mỗi phép đo có một *sai số*. Sai số là do sự thiếu chính xác hay chưa đúng. *Độ chính xác* là mức độ tái lập kết quả khi phép đo được lặp lại; *độ đúng* là mức độ tương ứng của kết quả đo với giá trị thực.

Sự thiếu chính xác là do *các sai số ngẫu nhiên* hay tình cờ; sai số được đánh giá tốt nhất bằng *độ lệch tiêu chuẩn*, ký hiệu σ; được định nghĩa như sau

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 , \qquad (118)$$

trong đó $\bar{x}$ là giá trị trung bình của các kết quả đo x_i. (Bạn có biết tại sao người ta dùng $n-1$ trong công thức thay vì n không?) Câu đố 144 s

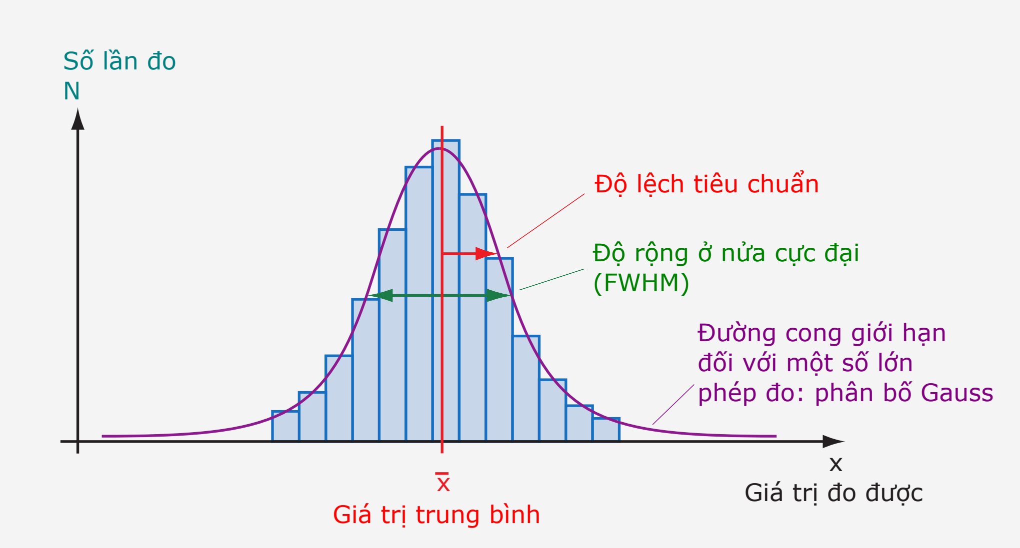
Đối với phần lớn các thí nghiệm, sự phân bố của các giá trị đo được đều hướng tới phân bố chuẩn, còn gọi là *phân bố Gauss*, khi số lượng phép đo tăng lên. Phân bố biểu diễn trong Hình 85, được mô tả bởi biểu thức

$$N(x) \approx \mathrm{e}^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} . \qquad (119)$$

Bình phương của độ lệch tiêu chuẩn σ^2 được gọi là *phương sai*. Đối với phân bố Gauss của các giá trị đo được, 2.35σ là độ rộng tại nửa cực đại. Câu đố 145 e

Độ đúng không cao là do *các sai số hệ thống*;thường người ta chỉ có thể ước lượng các sai số này. Phần ước lượng này được thêm vào sai số ngẫu nhiên để tạo ra *sai số toàn phần của thí nghiệm*, đôi khi còn được gọi là *độ bất định toàn phần*. Xem 165 Sai số *tương đối* hay độ bất định là tỷ số giữa sai số và giá trị đo được.

Thí dụ một phép đo chuyên nghiệp sẽ cho một kết quả như 0.312(6) m. Con số giữa



HÌNH 85 Một thí nghiệm chính xác và phân bố của các giá trị đo được. Sự chính xác cao nếu bề rộng của phân bố hẹp; độ đúng cao nếu tâm của phân bố phù hợp với giá trị thực.

hai dấu ngoặc đơn là độ lệch tiêu chuẩn σ, theo đơn vị của chữ số cuối cùng. Theo trên, ta đã giả sử kết quả đo tuân theo phân bố Gauss. Do đó, một giá trị 0.312(6) m hàm ý rằng giá trị thực theo mong đợi nằm

Câu đố 146 e

— trong khoảng 1σ với xác suất 68.3 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.006 m;
— trong khoảng 2σ với xác suất 95.4 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.012 m;
— trong khoảng 3σ với xác suất 99.73 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.018 m;
— trong khoảng 4σ với xác suất 99.9937 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.024 m;
— trong khoảng 5σ với xác suất 99.999 943 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.030 m;
— trong khoảng 6σ với xác suất 99.999 999 80 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.036 m;
— trong khoảng 7σ với xác suất 99.999 999 999 74 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.041 m.

Câu đố 147 s

(Những con số sau có ý nghĩa không?)

Nên nhớ rằng độ lệch tiêu chuẩn có 1 chữ số; bạn phải là một chuyên gia tầm cỡ thế giới mới dùng 2 chữ số, và một anh hề mới dùng nhiều chữ số hơn. Nếu không cho độ lệch tiêu chuẩn, thì xem như bằng (1). Kết quả, đối với các tay chuyên nghiệp, thì 1 km và 1000 m *không* giống nhau!

Điều gì sẽ xảy ra cho các sai số khi hai giá trị đo được A và B được cộng hay trừ với nhau? Nếu tất cả các phép đo độc lập – hay không tương quan – độ lệch tiêu chuẩn của

tổng *và* hiệu sẽ là $\sigma = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}$. Đối với tích hay thương của hai giá trị đo được không tương quan C và D, kết quả là $\rho = \sqrt{\rho_C^2 + \rho_D^2}$, ở đây ρ là độ lệch tiêu chuẩn *tương đối*.

Câu đố 148 s Giả sử bạn đo được một vật đi được 1.0 m trong 3.0 s: giá trị đo được của tốc độ là bao nhiêu?

Giới hạn của độ chính xác

Giới hạn của độ đúng và độ chính xác là gì? Không có cách nào, ngay cả theo nguyên tắc, để đo một chiều dài x với *độ chính xác* cao hơn 61 chữ số, vì trong thiên nhiên, tỷ số giữa chiều dài lớn nhất và nhỏ nhất có thể đo được là $\Delta x/x > l_{\text{Pl}}/d_{\text{horizon}} = 10^{-61}$. (Tỷ số này còn đúng với lực và thể tích không?) Câu đố 149 e Trong quyển sách sau cùng của chúng ta, việc nghiên cứu đồng hồ và thước sẽ củng cố cho giới hạn lý thuyết này.

Quyển VI, trang 94 Cũng dễ suy ra các giới hạn thực tế chặt chẽ hơn. Không có máy móc tưởng tượng nào có thể đo các đại lượng với độ chính xác cao hơn phép đo đường kính của Trái đất trong phạm vi chiều dài nhỏ nhất đã đo được, khoảng 10^{-19} m; giới hạn đó có khoảng 26 chữ số chính xác. Dùng một giới hạn hiện thực hơn của một máy có kích cỡ 1000 m sẽ dẫn tới một giới hạn 22 chữ số. Nếu, như đã tiên đoán ở trên, các phép đo thời gian thực sự đạt tới 17 chữ số chính xác, thì chúng đang tiến gần đến giới hạn thực tế, vì tách rời khỏi kích thước, có một ràng buộc thực tế phụ: chi phí. Thật vậy, thêm một chữ số chính xác trong phép đo thường có nghĩa là thêm một chữ số vào chi phí thiết bị.

Các hằng số vật lý

Trong vật lý, các quan trắc tổng quát được suy ra từ các quan trắc cơ bản hơn. Kết quả là nhiều phép đo có thể được suy ra từ những phép đo cơ bản hơn. Các phép đo cơ bản nhất là các phép đo các hằng số vật lý.

Các bảng sau đây cho các giá trị tốt nhất thế giới của các hằng số vật lý và các tính chất quan trọng nhất – theo đơn vị SI và vài đơn vị quen thuộc khác – như đã công bố Xem 166 trong phần tham khảo các tiêu chuẩn. Các giá trị là trung bình của các phép đo tốt nhất thế giới đã được thực hiện cho đến nay. Như thường lệ, sai số thực nghiệm, bao gồm cả sai số ngẫu nhiên và sai số hệ thống đã được ước lượng, biểu diễn theo dạng độ lệch tiêu chuẩn được cho vào chữ số cuối cùng. Đúng ra thì sau mỗi số trong các bảng sau đây là Xem 167 một câu chuyện dài đáng kể lại, nhưng ở đây không đủ chỗ để làm việc đó.

Về nguyên tắc, *mọi* tính chất định lượng của vật chất đều có thể tính toán bằng Thuyết lượng tử – nói chính xác hơn là các phương trình của mô hình chuẩn của hạt – và tập Quyển V, trang 260 hợp các hằng số *cơ bản* được cho trong bảng sau đây. Thí dụ như màu sắc, mật độ và các tính chất đàn hồi đều có thể tiên đoán được bằng phương thức này.

BẢNG 11 Các hằng số vật lý cơ bản.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị theo đơn vị SI	Độ bđ.[a]
Các hằng số dùng để định nghĩa các đơn vị đo lường SI			
Tốc độ của ánh sáng trong chân không [c]	c	299 792 458 m/s	0
Hằng số Planck [c]	h	$6.626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ Js	0
Hằng số Planck rút gọn, lượng tử tác dụng	$\hbar$	$1.054\,571\,817 \ldots \cdot 10^{-34}$ Js	0

BẢNG 11 (Tiếp theo) Các hằng số vật lý cơ bản.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị theo đơn vị SI	Độ bđ[a]
Điện tích Positron [c]	e	0.160 217 6634 aC	0
Hằng số Boltzmann [c]	k	$1.380\,649 \cdot 10^{-23}$ J/K	0
Số Avogadro	N_{A}	$6.022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ 1/mol	0
Hằng số *sẽ* dùng để định nghĩa đơn vị đo lường SI			
Hằng số hấp dẫn	G	$6.674\,30(15) \cdot 10^{-11}\ \mathrm{Nm^2/kg^2}$	$2.2 \cdot 10^{-5}$
Các hằng số cơ bản khác			
Số chiều không-thời gian		3 + 1	0 [b]
Hằng số cấu trúc tinh tế [d] hay	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c}$	1/137.035 999 084(21)	$1.5 \cdot 10^{-10}$
hằng số liên kết điện từ	$= g_{\mathrm{em}}(m_e^2c^2)$	= 0.007 297 352 5693(11)	$1.5 \cdot 10^{-10}$
Hằng số liên kết Fermi [d] hay	$G_{\mathrm{F}}/(\hbar c)^3$	$1.166\,3787(6) \cdot 10^{-5}\ \mathrm{GeV^{-2}}$	$5.1 \cdot 10^{-7}$
hằng số liên kết yếu	$\alpha_{\mathrm{w}}(M_{\mathrm{Z}}) = g_{\mathrm{w}}^2/(4\pi)$	1/30.1(3)	$1 \cdot 10^{-2}$
Hằng số liên kết mạnh [d]	$\alpha_{\mathrm{s}}(M_{\mathrm{Z}}) = g_{\mathrm{s}}^2/(4\pi)$	0.1179(10)	$8.5 \cdot 10^{-3}$
Góc hoà trộn yếu	$\sin^2\theta_{\mathrm{W}}(\overline{MS})$	0.231 22(4)	$1.7 \cdot 10^{-4}$
	$\sin^2\theta_{\mathrm{W}}$ (trên mặt)	0.222 90(30)	$1.3 \cdot 10^{-3}$
	$= 1 - (m_{\mathrm{W}}/m_{\mathrm{Z}})^2$		
Matrix hoà trộn quark CMK	$\lvert V \rvert$	$\begin{pmatrix} 0.97383(24) & 0.2272(10) & 0.00396(9) \\ 0.2271(10) & 0.97296(24) & 0.04221(80) \\ 0.00814(64) & 0.04161(78) & 0.999100(34) \end{pmatrix}$	
Bất biến Jarlskog	J	$3.08(18) \cdot 10^{-5}$	
Matrix hoà trộn neutrino PMNS	$\lvert P \rvert$	$\begin{pmatrix} 0.82(2) & 0.55(4) & 0.150(7) \\ 0.37(13) & 0.57(11) & 0.71(7) \\ 0.41(13) & 0.59(10) & 0.69(7) \end{pmatrix}$	
Khối lượng Electron	m_{e}	$9.109\,383\,7015(28) \cdot 10^{-31}$ kg	$3.0 \cdot 10^{-10}$
		$5.485\,799\,090\,65(16) \cdot 10^{-4}$ u	$2.9 \cdot 10^{-11}$
		0.510 998 950 00(15) MeV	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Khối lượng Muon	m_{μ}	$1.883\,531\,627(42) \cdot 10^{-28}$ kg	$2.2 \cdot 10^{-8}$
		105.658 3755(23) MeV	$2.2 \cdot 10^{-8}$
Khối lượng Tau	m_{τ}	$1.776\,82(12)\ \mathrm{GeV}/c^2$	$6.8 \cdot 10^{-5}$
Khối lượng neutrino electron	m_{ν_e}	$< 2\ \mathrm{eV}/c^2$	
Khối lượng neutrino Muon	m_{ν_μ}	$< 2\ \mathrm{eV}/c^2$	
Khối lượng neutrino Tau	m_{ν_τ}	$< 2\ \mathrm{eV}/c^2$	
Khối lượng quark Up	u	$21.6(+0.49/-0.26)\ \mathrm{MeV}/c^2$	
Khối lượng quark Down	d	$4.67(+0.48/-0.17)\ \mathrm{MeV}/c^2$	
Khối lượng quark Strange	s	$93(+11/-5)\ \mathrm{MeV}/c^2$	
Khối lượng quark Charm	c	$1.27(2)\ \mathrm{GeV}/c^2$	
Khối lượng quark Bottom	b	$4.18(3)\ \mathrm{GeV}/c^2$	
Khối lượng quark Top	t	$172.9(0.4)\ \mathrm{GeV}/c^2$	
Khối lượng Photon	γ	$< 2 \cdot 10^{-54}$ kg	

BẢNG 11 (Tiếp theo) Các hằng số vật lý cơ bản.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị theo đơn vị SI	Độ bđ[a]
Khối lượng boson W	$W^{\pm}$	$80.379(12)\,\mathrm{GeV}/c^2$	
Khối lượng boson Z	Z^0	$91.1876(21)\,\mathrm{GeV}/c^2$	
Khối lượng Higgs	H	$125.10(14)\,\mathrm{GeV}/c^2$	
Khối lượng Gluon	$g_{1...8}$	$c.\ 0\,\mathrm{MeV}/c^2$	

a. Độ bất định: độ lệch tiêu chuẩn của sai số của phép đo.
b. Chỉ đo được từ 10^{-19} m tới 10^{26} m.
c. Hằng số định nghĩa.
d. Tất cả các hằng số liên kết phụ thuộc vào sự chuyển động lượng 4 chiều, như đã giải thích trong phần tái chuẩn hoá. *Hằng số cấu trúc tinh tế* là tên truyền thống của hằng số liên kết điện từ g_{em} trong trường hợp chuyển động lượng 4 chiều có $Q^2 = m_e^2 c^2$, là giá trị khả hữu nhỏ nhất. Ở mức chuyển động lượng cao hơn, nó có giá trị lớn hơn, tức là $g_{em}(Q^2 = M_W^2 c^2) \approx 1/128$. Trái lại, hằng số liên kết mạnh ở mức chuyển động lượng cao hơn, có giá trị nhỏ hơn; tức là $\alpha_s(34\,\mathrm{GeV}) = 0.14(2)$.

Page 131

Tại sao các hằng số cơ bản này lại có giá trị như vậy? Đối với một hằng số bất kỳ *có thứ nguyên*, như lượng tử tác dụng $\hbar$, trị số chỉ có giá trị lịch sử. Nó là $1.054 \cdot 10^{-34}$ Js vì định nghĩa SI của joule và giây. Do đó câu hỏi tại sao giá trị của một hằng số *có thứ nguyên* không lớn hơn hay nhỏ hơn, luôn luôn đòi hỏi ta hiểu nguồn gốc của các số *không thứ nguyên* là tỷ số giữa hằng số đó và *đơn vị tự nhiên* tương ứng được định nghĩa bằng c, G, k, N_A và $\hbar$. Thông tin và giá trị của các đơn vị tự nhiên được cho trong một phần riêng.

Trang 209

Việc tìm hiểu kích thước nguyên tử, con người, cây cối và ngôi sao, thời gian xảy ra của các quá trình phân tử và nguyên tử, khối lượng của hạt nhân và núi non, bao hàm việc tìm hiểu về các tỷ số giữa các giá trị này và đơn vị tự nhiên tương ứng. Như vậy điểm chính yếu của việc tìm hiểu thiên nhiên là tìm hiểu tất cả các tỷ số của phép đo, tức là tất cả các hằng số không thứ nguyên. Nhiệm vụ tìm hiểu tất cả các tỷ số, bao gồm chính hằng số cấu trúc tinh tế α, chỉ được hoàn tất trong quyển cuối cùng của cuộc phiêu lưu.

Các hằng số cơ bản sinh ra các kết quả quan sát hữu ích, có độ chính xác cao, sau đây:

BẢNG 12 Các hằng số vật lý dẫn xuất.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị theo đơn vị SI	Độ bđ.
Độ từ thẩm của chân không	μ_0	1.256 637 062 12(19) μH/m	$1.5 \cdot 10^{-10}$
Độ điện thẩm của chân không	$\varepsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$	8.854 187 8128(13) pF/m	$1.5 \cdot 10^{-10}$
Ba trở trong chân không	$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$	376.730 313 668(57) Ω	$1.5 \cdot 10^{-10}$
Số Loschmidt ở 273.15 K và 101 325 Pa	N_L	$2.686\,780\,111... \cdot 10^{25}\ 1/\mathrm{m}^3$	0
Hằng số Faraday	$F = N_A e$	96 485.332 12... C/mol	0
Hằng số khí phổ dụng	$R = N_A k$	8.314 462 618... J/(mol K)	0
Thể tích mol của khí lý tưởng ở 273.15 K và 101 325 Pa	$V = RT/p$	22.413 969 54... l/mol	0
Hằng số Rydberg [a]	$R_\infty = m_e c\alpha^2/(2h)$	$10\,973\,731.568\,160(21)\ \mathrm{m}^{-1}$	$1.9 \cdot 10^{-12}$

BẢNG 12 (Tiếp theo) Các hằng số vật lý dẫn xuất.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị theo đơn vị SI	Độ bđ.
Lượng tử độ dẫn	$G_0 = 2e^2/h$	77.480 917 29... µS	0
Lượng tử từ thông	$\varphi_0 = h/(2e)$	2.067 833 848... fWb	0
Tỷ số tần số Josephson	$2e/h$	483.597 8484... THz/V	0
Hằng số Von Klitzing	$h/e^2 = \mu_0 c/(2\alpha)$	25 812.807 45... Ω	0
Magneton Bohr	$\mu_B = e\hbar/(2m_e)$	9.274 010 0783(28) yJ/T	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Bán kính electron cổ điển	$r_e = e^2/(4\pi\varepsilon_0 m_e c^2)$	2.817 940 3262(13) fm	$4.5 \cdot 10^{-10}$
Bước sóng Compton	$\lambda_C = h/(m_e c)$	2.426 310 238 67(73) pm	$3.0 \cdot 10^{-10}$
của electron	$\lambda\!\!\!^{-}_c = \hbar/(m_e c) = r_e/\alpha$	0.386 159 267 96(12) pm	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Bán kính Bohr [a]	$a_\infty = r_e/\alpha^2$	52.917 721 0903(80) pm	$1.5 \cdot 10^{-10}$
Lượng tử của lưu số	$h/(2m_e)$	3.636 947 5516(11) cm^2/s	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Điện tích riêng của positron	e/m_e	175.882 001 076(55) GC/kg	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Tần số Cyclotron của electron	$f_c/B = e/(2\pi m_e)$	27.992 489 872(9) GHz/T	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Moment từ của electron	μ_e	−9.284 764 7043(28) yJ/T	$3.0 \cdot 10^{-10}$
	μ_e/μ_B	−1.001 159 652 181 28(18)	$1.7 \cdot 10^{-13}$
	μ_e/μ_N	$-1\,838.281\,971\,88(11) \cdot 10^3$	$6.0 \cdot 10^{-11}$
Thừa số g của electron	g_e	−2.002 319 304 362 56(35)	$1.7 \cdot 10^{-13}$
Tỷ khối muon–electron	m_μ/m_e	206.768 2830(46)	$2.2 \cdot 10^{-8}$
Moment từ của muon	μ_μ	$-4.490\,448\,30(10) \cdot 10^{-26}$ J/T	$2.2 \cdot 10^{-8}$
Thừa số g của muon	g_μ	−2.002 331 8418(13)	$6.3 \cdot 10^{-10}$
Đơn vị khối lượng nguyên tử	$1\,u = m_{^{12}C}/12$	$1.660\,539\,066\,60(50) \cdot 10^{-27}$ kg	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Khối lượng proton	m_p	$1.672\,621\,923\,69(51) \cdot 10^{-27}$ kg	$3.1 \cdot 10^{-10}$
		1.007 276 466 621(53) u	$5.3 \cdot 10^{-11}$
		938.272 088 16(29) MeV	$3.1 \cdot 10^{-10}$
Tỷ khối proton–electron	m_p/m_e	1 836.152 673 43(11)	$6.0 \cdot 10^{-11}$
Điện tích riêng của proton	e/m_p	$9.578\,833\,1560(29) \cdot 10^7$ C/kg	$3.1 \cdot 10^{-10}$
Bước sóng Compton của proton	$\lambda_{C,p} = h/(m_p c)$	1.321 409 855 39(40) fm	$3.1 \cdot 10^{-10}$
Magneton hạt nhân	$\mu_N = e\hbar/(2m_p)$	$5.050\,783\,7461(15) \cdot 10^{-27}$ J/T	$3.1 \cdot 10^{-10}$
Moment từ của proton	μ_p	$1.410\,606\,797\,36(60) \cdot 10^{-26}$ J/T	$4.2 \cdot 10^{-10}$
	μ_p/μ_B	$1.521\,032\,202\,30(46) \cdot 10^{-3}$	$3.0 \cdot 10^{-10}$
	μ_p/μ_N	2.792 847 344 63(82)	$2.9 \cdot 10^{-10}$
Tỷ số hồi chuyển từ của proton	$\gamma_p = 2\mu_p/h$	42.577 478 518(18) MHz/T	$4.2 \cdot 10^{-10}$
Thừa số g của proton	g_p	5.585 694 6893(16)	$2.9 \cdot 10^{-10}$
Khối lượng neutron	m_n	$1.674\,927\,498\,04(95) \cdot 10^{-27}$ kg	$5.7 \cdot 10^{-10}$
		1.008 664 915 95(43) u	$4.8 \cdot 10^{-10}$
		939.565 420 52(54) MeV	$5.7 \cdot 10^{-10}$
Tỷ khối neutron–electron	m_n/m_e	1 838.683 661 73(89)	$4.8 \cdot 10^{-10}$
Tỷ khối neutron–proton	m_n/m_p	1.001 378 419 31(49)	$4.9 \cdot 10^{-10}$
Bước sóng Compton của neutron	$\lambda_{C,n} = h/(m_n c)$	1.319 590 905 81(75) fm	$5.7 \cdot 10^{-10}$

BẢNG 12 (Tiếp theo) Các hằng số vật lý dẫn xuất.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị theo đơn vị SI	Độ bđ.
Moment từ của neutron	μ_n	$-0.966\,236\,51(23) \cdot 10^{-26}$ J/T	$2.4 \cdot 10^{-7}$
	μ_n/μ_B	$-1.041\,875\,63(25) \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-7}$
	μ_n/μ_N	$-1.913\,042\,73(45)$	$2.4 \cdot 10^{-7}$
Hằng số Stefan–Boltzmann	$\sigma = \pi^2 k^4/(60\hbar^3 c^2)$	56.703 744 19... nW/(m^{2}K^4)	0
Hằng số dịch chuyển Wien	$b = \lambda_{max} T$	2.897 771 955... mmK	0
		58.789 257 57... GHz/K	0
Electron volt	eV	0.160 217 6634... aJ	0
Hệ số chuyển đổi bit sang entropy	$k \ln 2$	10^{23} bit = 0.956 994... J/K	0
Năng lượng của TNT		3.7 tới 4.0 MJ/kg	$4 \cdot 10^{-2}$

a. Đối với khối lượng hạt nhân lớn vô hạn.

Một số tính chất hữu ích của môi trường địa phương của chúng ta được cho trong bảng sau đây.

BẢNG 13 Các hằng số thiên văn.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị
Năm tropic 1900 [a]	a	31 556 925.974 7 s
Năm tropic 1994	a	31 556 925.2 s
Ngày sao trung bình	d	$23^h 56' 4.090\,53''$
Khoảng cách Trái đất–Mặt trời trung bình [b]		149 597 870.691(30) km
Đơn vị thiên văn [b]	AU	149 597 870 691 m
Năm ánh sáng, căn cứ trên năm Julian [b]	al	9.460 730 472 5808 Pm
Parsec	pc	30.856 775 806 Pm = 3.261 634 al
Khối lượng Trái đất	$M_♁$	$5.973(1) \cdot 10^{24}$ kg
Hằng số hấp dẫn địa tâm	GM	$3.986\,004\,418(8) \cdot 10^{14}$ m^3/s^2
Chiều dài hấp dẫn của Trái đất	$l_♁ = 2GM/c^2$	8.870 056 078(16) mm
Bán kính xích đạo của Trái đất [c]	$R_{♁eq}$	6378.1366(1) km
Bán kính cực của Trái đất [c]	$R_{♁p}$	6356.752(1) km
Khoảng cách xích đạo–cực [c]		10 001.966 km (trung bình)
Độ phẳng của Trái đất [c]	$e_♁$	1/298.25642(1)
Mật độ trung bình của Trái đất	$\rho_♁$	5.5 Mg/m^3
Tuổi Trái đất	$T_♁$	4.50(4) Ga = 142(2) Ps
Gia tốc trọng lực	g	9.806 65 m/s^2
Áp suất khí quyển chuẩn của Trái đất	p_0	101 325 Pa
Bán kính Mặt trăng	$R_{☾v}$	1738 km theo hướng của Trái đất
Bán kính Mặt trăng	$R_{☾h}$	1737.4 km theo hai hướng khác
Khối lượng Mặt trăng	$M_☾$	$7.35 \cdot 10^{22}$ kg
Khoảng cách trung bình tới Mặt trăng [d]	$d_☾$	384 401 km

BẢNG 13 (Tiếp theo) Các hằng số thiên văn.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị
Khoảng cách tới Mặt trăng ở điểm cận địa [d]		tiêu biểu 363 Mm, cực tiểu trong lịch sử 359 861 km
Khoảng cách tới Mặt trăng ở điểm viễn địa [d]		tiêu biểu 404 Mm, cực đại trong lịch sử 406 720 km
Kích thước góc của Mặt trăng [e]		trung bình 0.5181° = 31.08 ′, cực tiểu 0.49°, cực đại 0.55°
Mật độ trung bình của Mặt trăng	$\rho_☾$	$3.3\,\mathrm{Mg/m^3}$
Gia tốc hấp dẫn tại bề mặt Mặt trăng	$g_☾$	$1.62\,\mathrm{m/s^2}$
Áp suất khí quyển Mặt trăng	$p_☾$	từ 10^{-10} Pa (đêm) tới 10^{-7} Pa (ngày)
Khối lượng Mộc tinh	$M_♃$	$1.90 \cdot 10^{27}$ kg
Bán kính Mộc tinh, xích đạo	$R_♃$	71.398 Mm
Bán kính Mộc tinh, cực	$R_♃$	67.1(1) Mm
Khoảng cách trung bình Mộc tinh-Mặt trời	$D_♃$	778 412 020 km
Gia tốc hấp dẫn tại bề mặt Mộc tinh	$g_♃$	$24.9\,\mathrm{m/s^2}$
Áp suất khí quyển Mộc tinh	$p_♃$	từ 20 kPa tới 200 kPa
Khối lượng Mặt trời	$M_\odot$	$1.988\,43(3) \cdot 10^{30}$ kg
Chiều dài hấp dẫn của Mặt trời	$2GM_\odot/c^2$	2.953 250 08(5) km
Hằng số hấp dẫn nhật tâm	$GM_\odot$	$132.712\,440\,018(8) \cdot 10^{18}\,\mathrm{m^3/s^2}$
Độ trưng của Mặt trời	$L_\odot$	384.6 YW
Bán kính xích đạo Mặt trời	$R_\odot$	695.98(7) Mm
Kích thước góc của Mặt trời		0.53° trung bình; cực tiểu vào ngày 4/7 (điểm viễn nhật) 1888 ″, cực đại vào ngày 4/1 (điểm cận nhật) 1952 ″
Mật độ trung bình của Mặt trời	$\rho_\odot$	$1.4\,\mathrm{Mg/m^3}$
Khoảng cách trung bình tới Mặt trời	AU	149 597 870.691(30) km
Tuổi Mặt trời	$T_\odot$	4.6 Ga
Vận tốc Mặt trời quanh tâm thiên hà	$v_{\odot g}$	220(20) km/s
Vận tốc Mặt trời đối với nền vũ trụ	$v_{\odot b}$	370.6(5) km/s
Gia tốc hấp dẫn tại bề mặt Mặt trời	$g_\odot$	$274\,\mathrm{m/s^2}$
Áp suất hạ quang quyển của Mặt trời	$p_\odot$	15 kPa
Khoảng cách tới tâm Ngân hà		8.0(5) kpc = 26.1(1.6) kal
Tuổi Ngân hà		13.6 Ga
Kích thước Ngân hà		*c.* 10^{21} m hay 100 kal
Khối lượng Ngân hà		10^{12} khối lượng Mặt trời, *c.* $2 \cdot 10^{42}$ kg
Đám thiên hà xa nhất đã biết	SXDF-XCLJ 0218-0510	$9.6 \cdot 10^9$ al

a. Định nghĩa một hằng lượng giữa 2 lần đi qua điểm xuân phân liên tiếp; đã có lần người ta

dùng nó để định nghĩa giây. (Nên nhớ: π s thì bằng cỡ một nano-thế kỷ.) Giá trị 1990 thì ít hơn khoảng 0.7 s, tương ứng với với việc đi chậm lại khoảng 0.2 ms/a. (Coi chừng: tại sao?) Có cả một công thức theo kinh nghiệm dành cho sự thay đổi chiều dài của năm theo thời gian.

Câu đố 150 s
Xem 168

b. Độ chính xác đáng kinh ngạc trong khoảng cách trung bình Trái đất–Mặt trời, vì chỉ có 30 m, là nhờ việc đo thời gian trung bình của các tín hiệu gởi từ phi thuyền Viking và phi thuyền thám hiểm Hoả tinh được thực hiện trong thời gian hơn 20 năm. Cũng nên nhớ rằng Hiệp hội thiên văn quốc tế phân biệt khoảng cách trung bình Trái đất–Mặt trời với *đơn vị thiên văn*; đại lượng sau được định nghĩa như một chiều dài cố định và chính xác. *Năm ánh sáng* cũng là một đơn vị được IAU định nghĩa là một con số chính xác. Để biết thêm chi tiết, hãy xem trang www.iau.org/public/measuring.

c. Hình dạng của Trái đất được Hệ thống trắc địa thế giới mô tả chính xác nhất. Ấn bản sau cùng đã có từ năm 1984. Để có một cái nhìn bao quát về nền tảng cũng như chi tiết, hãy xem website www.wgs84.com. Hiệp hội trắc địa quốc tế đã tinh lọc dữ liệu trong năm 2000. Bán kính và độ phẳng được ghi ra đây là dữ liệu dành cho 'hệ thuỷ triều trung bình'. Chúng khác với dữ liệu của 'hệ không thuỷ triều' và các hệ khác vào khoảng 0.7 m. Các thông tin cũng đã tự tạo thành một khoa học.

d. Được đo giữa 2 tâm. Để tìm vị trí chính xác của Mặt trăng vào ngày tháng đã cho, hãy xem trang www.fourmilab.ch/earthview/moon_ap_per.html. Đối với các hành tinh hãy xem trang www.fourmilab.ch/solar/solar.html và các trang khác trên cùng site.

e. Góc được định nghĩa như sau: 1 độ = $1^\circ = \pi/180$ rad, 1 phút (đầu tiên) = $1' = 1^\circ/60$, 1 giây (phút) = $1'' = 1'/60$. Các đơn vị cổ 'phút thứ 3' và 'phút thứ tư', mỗi đơn vị là 1/60 của đơn vị đứng trước, không còn được sử dụng nũa. ('Minute' có nghĩa là 'rất nhỏ' và nó vẫn còn giữ nghĩa đó trong Anh văn hiện đại.)

Một số tính chất của thiên nhiên ở tầm cỡ lớn được liệt kê trong bảng dưới đây. (Thêm một câu đố, bạn có thể xác định xem một tính chất bất kỳ của vũ trụ đã được liệt kê hay chưa?)

Câu đố 151 s

BẢNG 14 Các hằng số vũ trụ.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị
Hằng số vũ trụ	Λ	*c*. $1 \cdot 10^{-52}$ m^{-2}
Tuổi của vũ trụ [a]	t_0	$4.333(53) \cdot 10^{17}$ s = $13.8(0.1) \cdot 10^9$ a
(được xác định từ không-thời gian, thông qua sự giãn nở, và sử dụng Thuyết tương đối tổng quát)		
Tuổi của vũ trụ [a]	t_0	trên $3.5(4) \cdot 10^{17}$ s = $11.5(1.5) \cdot 10^9$ a
(được xác định từ vật chất, thông qua các thiên hà và ngôi sao, sử dụng Thuyết lượng tử)		
Tham số Hubble [a]	H_0	$2.3(2) \cdot 10^{-18}$ s^{-1} = $0.73(4) \cdot 10^{-10}$ a^{-1}
		$= h_0 \cdot 100$ km/s Mpc $= h_0 \cdot 1.0227 \cdot 10^{-10}$ a^{-1}
Tham số Hubble rút gọn [a]	h_0	0.71(4)
Tham số giảm tốc [a]	$q_0 = -(\ddot{a}/a)_0/H_0^2$	−0.66(10)
Khoảng cách chân trời vũ trụ [a]	$d_0 = 3ct_0$	$40.0(6) \cdot 10^{26}$ m = 13.0(2) Gpc
Topo của vũ trụ		độ không rời rạc lên tới 10^{26} m
Số chiều của không gian		3, cho các khoảng cách lên tới 10^{26} m
Mật độ tới hạn của vũ trụ	$\rho_c = 3H_0^2/(8\pi G)$	$h_0^2 \cdot 1.878\,82(24) \cdot 10^{-26}$ kg/m^3 = $0.95(12) \cdot 10^{-26}$ kg/m^3
Tham số mật độ (toàn phần) [a]	$\Omega_0 = \rho_0/\rho_c$	1.02(2)
Tham số mật độ Baryon [a]	$\Omega_{B0} = \rho_{B0}/\rho_c$	0.044(4)

BẢNG 14 (Tiếp theo) Các hằng số vũ trụ.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị
Tham số mật độ vật chất tối lạnh [a]	$\Omega_{CDM0} = \rho_{CDM0}/\rho_c$	0.23(4)
Tham số mật độ Neutrino [a]	$\Omega_{\nu 0} = \rho_{\nu 0}/\rho_c$	0.001 to 0.05
Tham số mật độ năng lượng tối [a]	$\Omega_{X0} = \rho_{X0}/\rho_c$	0.73(4)
Tham số trạng thái năng lượng tối	$w = p_X/\rho_X$	−1.0(2)
Khối lượng Baryon	m_b	$1.67 \cdot 10^{-27}$ kg
Mật độ số Baryon		$0.25(1)\,/\mathrm{m}^3$
Mật độ vật chất sáng		$3.8(2) \cdot 10^{-28}\,\mathrm{kg/m^3}$
Số ngôi sao trong vũ trụ	n_s	$10^{22\pm1}$
Số Baryon trong vũ trụ	n_b	$10^{81\pm1}$
Nhiệt độ nền vi ba [b]	T_0	2.725(1) K
Số Photon trong vũ trụ	n_γ	10^{89}
Mật độ năng lượng Photon	$\rho_\gamma = \pi^2 k^4/(15 T_0^4)$	$4.6 \cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg/m^3}$
Mật độ số Photon		$410.89\,/\mathrm{cm}^3$ hay $400\,/\mathrm{cm}^3 (T_0/2.7\,\mathrm{K})^3$
Biên độ nhiễu loạn mật độ	$\sqrt{S}$	$5.6(1.5) \cdot 10^{-6}$
Biên độ sóng hấp dẫn	$\sqrt{T}$	$< 0.71 \sqrt{S}$
Thăng giáng khối lượng cho 8 Mpc	σ_8	0.84(4)
Chỉ số vô hướng	n	0.93(3)
Độ biến thiên của chỉ số vô hướng	$\mathrm{d}n/\mathrm{d}\ln k$	−0.03(2)
Chiều dài Planck	$l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$1.62 \cdot 10^{-35}$ m
Thời gian Planck	$t_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$5.39 \cdot 10^{-44}$ s
Khối lượng Planck	$m_{Pl} = \sqrt{\hbar c/G}$	21.8 µg
Số khoảnh khắc trong lịch sử [a]	t_0/t_{Pl}	$8.7(2.8) \cdot 10^{60}$
Số điểm không-thời gian trong chân trời [a]	$N_0 = (R_0/l_{Pl})^3 \cdot (t_0/t_{Pl})$	$10^{244\pm1}$
Khối lượng trong chân trời	M	$10^{54\pm1}$ kg

a. Chỉ số 0 chỉ giá trị hiện tại.
b. Bức xạ phát sinh khi vũ trụ được 380 000 tuổi và có nhiệt độ khoảng 3000 K; độ thăng giáng ΔT_0 dẫn tới việc hình thành thiên hà ngày nay khoảng $16 \pm 4\,\mu\mathrm{K} = 6(2) \cdot 10^{-6}\, T_0$.

Quyển II, trang 235

Các số hữu ích

Xem 169

π	3.14159 26535 89793 23846 26433 83279 50288 41971 69399 37510$_5$
e	2.71828 18284 59045 23536 02874 71352 66249 77572 47093 69995$_9$
γ	0.57721 56649 01532 86060 65120 90082 40243 10421 59335 93992$_3$
ln 2	0.69314 71805 59945 30941 72321 21458 17656 80755 00134 36025$_5$
ln 10	2.30258 50929 94045 68401 79914 54684 36420 76011 01488 62877$_2$
$\sqrt{10}$	3.16227 76601 68379 33199 88935 44432 71853 37195 55139 32521$_6$

Nếu số π có tính *chuẩn tắc*, tức là nếu mọi chữ số và mọi tổ hợp chữ số trong phần thập phân của nó xuất hiện với tần số giới hạn như nhau, thì mỗi luận văn đã viết hoặc chưa viết, mỗi từ đã được nói hay chưa nói, đều đã được mã hoá trong các dãy của pi. Tính chuẩn tắc chưa được chứng minh, mặc dù người ta tin là có nó. Như vậy mọi hiểu biết của loài người đều được mã hoá trong một vòng tròn đơn giản hay sao? Không. Tính chất này không có gì đặc biệt: Nó cũng có thể áp dụng cho số 0.123456789101112131415161718192021... và nhiều số khác. Bạn có thể chỉ ra một vài thí dụ không?

Câu đố 152 s

Tiện thể trong đồ thị của hàm số mũ e^x, điểm (0, 1) là điểm duy nhất có toạ độ hữu tỉ. Nếu bạn sơn bằng trí tưởng tượng mọi điểm trên mặt phẳng có toạ độ hữu tỉ bằng màu xanh thì mặt phẳng trông cũng khá xanh. Tuy vậy, đồ thị chỉ đi qua điểm này và không đi qua các điểm còn lại.

Phụ lục 11

Số và không gian vector

> Một nhà toán học là một cái máy biến đổi cà phê thành các định lý.
>
> Paul Erdős (b. 1913 Budapest, d. 1996 Warsaw)

Các khái niệm toán học đều có thể phát biểu theo ngôn ngữ 'tập hợp' và 'quan hệ.' Nhiều khái niệm cơ bản được trình bày trong chương cuối này. Tại sao toán học, với các nền tảng đơn giản này, lại trở thành niềm đam mê đối với một số người nào đó? Làm thế nào tập hợp và quan hệ lại trở thành trung tâm của đời sống con người? Phần phụ lục toán học trình bày một vài khái niệm cao cấp dưới dạng đơn giản và sinh động nhất, cho tất cả những ai muốn tìm hiểu và cảm nhận niềm đam mê toán học.

Quyển III, trang 284
Xem 170

Nhưng không may là niềm đam mê toán học không dễ được nhận ra vì, giống như nhiều nghề khác, các toán gia cũng *che giấu* niềm đam mê của họ. Trong toán học, điều này được thực hiện thông qua chủ nghĩa hình thức và sự tách rời khỏi trực giác. Tuy vậy việc dạy toán nghiêm túc sẽ đưa trực giác lên hàng đầu. Trong phụ lục này ta sẽ giới thiệu những cấu trúc *đại số* đơn giản nhất. Phụ lục trong quyển kế tiếp sẽ trình bày một số cấu trúc đại số phức tạp hơn kèm theo các cấu trúc *topo* quan trọng nhất; cấu trúc toán học cơ bản thứ ba, cấu trúc *thứ tự*, thì không quan trọng lắm trong vật lý – trừ một điểm: định nghĩa của số thực có chứa một cấu trúc thứ tự.

Các toán gia không những có nhiệm vụ tìm hiểu các khái niệm mà còn phải *phân loại* chúng. Khi giới thiệu một khái niệm toán học mới, các toán gia cố gắng phân loại mọi trường hợp và mọi loại khả hữu. Người ta đã đạt được nhiều thành tựu ngoạn mục nhất trong các lĩnh vực số, nhóm đơn hữu hạn, các loại không gian và đa tạp.

Số với vai trò là các cấu trúc toán học

Câu đố 153 ny

> Toán gia là người có thể giải phương trình $x^2 - 92y^2 = 1$ trong thời gian ít hơn 1 năm.
>
> Brahmagupta (b. 598 Sindh, d. 668) (hàm ý: giải trên tập hợp *số nguyên*)

Đến trẻ em cũng biết: số là các thực thể có thể cộng và nhân. Toán gia thì nhận thức rõ hơn. Một hệ toán học bất kỳ có cùng các tính chất cơ bản như *số tự nhiên* đều được gọi là *nửa vành*. Một hệ toán học bất kỳ có cùng các tính chất cơ bản như *số nguyên* đều được gọi là *vành*. (Các thuật ngữ đều do David Hilbert đưa ra. Cả hai cấu trúc đều có thể là hữu hạn.) Nói chính xác hơn, một *vành* $(R, +, \cdot)$ là một tập hợp R các phần tử với 2 phép tính nhị nguyên, là *phép cộng* và *phép nhân*, thường ký hiệu là + và · (điều sau có thể dễ hiểu nên không cần giải thích tường minh), mà đối với chúng các tính chất sau

đây được nghiệm đúng cho mọi phần tử $a, b, c \in R$:

— R là nhóm giao hoán đối với phép cộng, tức là
$a + b \in R, a + b = b + a, a + 0 = a, a + (-a) = a - a = 0$ và $a + (b + c) = (a + b) + c$;
— R đóng đối với phép nhân, tức là $ab \in R$;
— phép nhân có tính kết hợp, tức là $a(bc) = (ab)c$;
— tính phân bố được nghiệm đúng, tức là $a(b + c) = ab + ac$ và $(b + c)a = ba + ca$.

Nhiều tác giả còn thêm tiên đề

— có một phần tử đơn vị đối với phép nhân, tức là $1a = a1 = a$.

Các định nghĩa về các tính chất như vậy được gọi là *các tiên đề*. Ta cũng nhấn mạnh là các tiên đề này *không phải là* các xác tín cơ bản như người ta thường nói hay ngụ ý; tiên đề là các tính chất cơ bản được sử dụng trong các định nghĩa của khái niệm: trong trường hợp này là định nghĩa của vành. Với tiên đề sau cùng người ta muốn nói về một *vành đơn vị*.

Nửa vành là một tập hợp thoả mãn mọi tiên đề của một vành, trừ sự hiện hữu của các phần tử trung hoà và phần tử đối đối với phép cộng được thay thế bằng điều kiện yếu hơn là nếu $a + c = b + c$ thì $a = b$. Nói một cách tuỳ tiện, nửa vành là vành 'không có' các phần tử đối.

Để kết hợp thêm phép chia và định nghĩa số hữu tỷ, ta cần một khái niệm khác. Một *trường số* hay *trường* K là một vành có

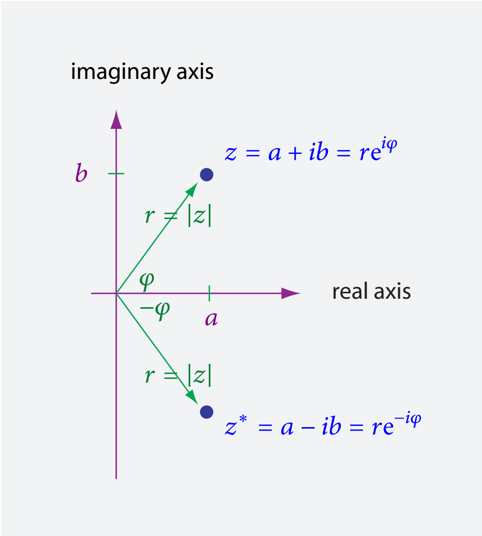
— một phần tử đơn vị đối với phép nhân 1, sao cho đối với mọi phần tử a ta đều có $1a = a$;
— ít nhất một phần tử khác 0; và quan trọng nhất
— một phần tử nghịch đảo (đối với phép nhân) a^{-1} cho mọi phần tử $a \neq 0$.

Một vành hay trường được gọi là *giao hoán* nếu phép nhân có tính giao hoán. Một trường không giao hoán còn được gọi là một *trường lệch*. Trường có thể hữu hạn hay vô hạn. (Một trường hay một vành được đặc trưng bằng một *đặc số* p. Đây là số lần ít nhất mà ta phải cộng 1 vào một số để được kết quả là 0. Nếu không có một số như vậy thì đặc số được cho bằng 0. p luôn luôn là một số nguyên tố hay 0.) Mọi trường hữu hạn đều giao hoán. Trong một trường, mọi phương trình có dạng $cx = b$ và $xc = b$ $(c \neq 0)$ đều có lời giải đối với x; phương trình có lời giải duy nhất nếu $b \neq 0$. Để tóm gọn bằng cách tập trung vào tính chất quan trọng nhất, trường cũng được định nghĩa là một tập hợp các phần tử cùng với các phép tính cộng, trừ, nhân và *chia* (bởi một phần tử khác 0). *Số hữu tỷ* là trường đơn giản nhất được kết hợp với số nguyên.

Hệ các *số thực* là sự mở rộng tối thiểu của các số hữu tỷ đầy đủ và được sắp thứ tự hoàn toàn.* Bạn có thể chứng minh rằng $\sqrt{2}$ là một số thực nhưng không phải là một

* Một tập hợp *đầy đủ* về mặt toán học nếu các vật lý gia gọi nó là liên tục. Nói chính xác hơn, một tập hợp số *đầy đủ* nếu mọi tập hợp con không trống bị chặn trên thì có một cận trên nhỏ nhất.

Một tập hợp *được sắp thứ tự hoàn toàn* nếu có một quan hệ nhị nguyên $\leqslant$ giữa các cặp phần tử sao cho đối với mọi phần tử a và b
— nếu $a \leqslant b$ và $b \leqslant c$, thì $a \leqslant c$;
— nếu $a \leqslant b$ và $b \leqslant a$, thì $a = b$;
— ta có $a \leqslant b$ hay $b \leqslant a$.
Tóm lại, một tập hợp được sắp thứ tự hoàn toàn nếu có một quan hệ nhị nguyên cho phép ta nói một cách



HÌNH 86 Số phức là các điểm trong một mặt phẳng 2 chiều; một số phức z và liên hợp của nó z^* có thể được mô tả dưới dạng descartes hay dạng cực.

Câu đố 154 e

số hữu tỷ không?

Trong Vật lý cổ điển và Thuyết lượng tử, ta luôn nhấn mạnh rằng kết quả đo là và phải là số thực. Nhưng có phải mọi số thực khả hữu đều là kết quả của một phép đo không? Nói cách khác, có đúng là mọi kết quả đo được là một tập hợp con của số thực không? Tuy vậy, khái niệm 'số' không bị giới hạn vào các thí dụ này. Ta có thể tổng quát hoá nó theo nhiều cách. Cách tổng quát hoá đơn giản nhất là là mở rộng số nguyên thành các đa tạp có nhiều hơn một chiều.

Câu đố 155 s
Xem 171

Số phức

Trong thiên nhiên, số phức là một phương thức thuận lợi để mô tả dưới dạng cô đọng các hệ và các trạng thái có chứa *phase*. Số phức có ích cho sự mô tả các loại sóng.

Số phức tạo thành một đa tạp 2 chiều. Một số phức được viết dưới dạng descartes, là $z = a + ib$, trong đó a và b là các số thực, và i là một ký hiệu mới, được gọi là *đơn vị ảo*. Dưới tác dụng của phép nhân, các phần tử sinh của số phức, 1 và i, tuân theo bảng sau

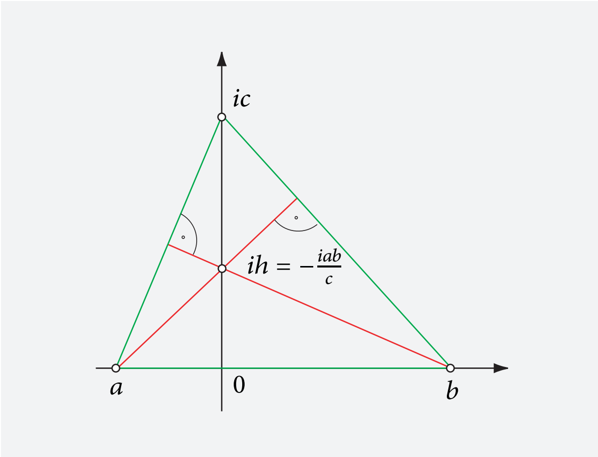
·	1	i
1	1	i
i	i	-1

(120)

thường được tóm tắt thành $i = +\sqrt{-1}$. Trong một số phức $z = a + ib$, a được gọi là *phần thực* và b là *phần ảo*. Chúng được minh hoạ trong Hình 86.

Liên hợp phức z^*, cũng được viết là $\bar{z}$, của một số phức $z = a + ib$ được định nghĩa là $z^* = a - ib$. *Giá trị tuyệt đối* $|z|$ của một số phức được định nghĩa là $|z| = \sqrt{zz^*} = \sqrt{z^* z} = \sqrt{a^2 + b^2}$. Nó xác định một *chuẩn* trên không gian vector của số phức. Từ

nhất quán về phần tử đứng trước trong hai phần tử bất kỳ. Đây là cấu trúc thứ tự cơ bản – và duy nhất – được sử dụng trong Vật lý.



HÌNH 87 Một tính chất của tam giác có thể được chứng minh một cách dễ dàng nhờ số phức.

$|wz| = |w|\,|z|$ ta suy ra *định lý hai bình phương*

$$(a_1^2 + a_2^2)(b_1^2 + b_2^2) = (a_1b_1 - a_2b_2)^2 + (a_1b_2 + a_2b_1)^2 \tag{121}$$

đúng cho mọi số phức a_i, b_i. Người ta đã biết định lý này dưới phiên bản số nguyên của Diophantus Alexandria trong thế kỷ thứ 3 CE.

Số phức cũng có thể được viết dưới dạng các cặp thứ tự (a, A) của số thực, với phép cộng được định nghĩa là $(a, A) + (b, B) = (a + b, A + B)$ và phép nhân được định nghĩa là $(a, A) \cdot (b, B) = (ab - AB, aB + bA)$. Ký hiệu này cho phép ta đồng nhất số phức với *các điểm* trên một mặt phẳng, hay nếu bạn thích, với *các mũi tên* trong một mặt phẳng. Việc dịch định nghĩa phép nhân thành ngôn ngữ hình học cho phép ta chứng minh nhanh các định lý hình học, như định lý trong Hình 87.

Câu đố 156 e

Ta cũng có thể biểu diễn số phức $a + ib$ bằng các matrix 2×2

$$\begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \quad \text{với} \quad a, b \in \mathbb{R} . \tag{122}$$

Phép cộng và nhân matrix lúc đó tương ứng với phép cộng và phép nhân số phức. Bằng cách này, số phức được biểu diễn bằng một loại matrix thực, đặc biệt. Trong ngôn ngữ matrix thì $|z|$ là cái gì?

Câu đố 157 s

Tập hợp $\mathbb{C}$ của số phức với phép cộng và phép nhân được định nghĩa như trên tạo thành một trường và một không gian vector 2 chiều giao hoán trên $\mathbb{R}$. Trong trường số phức, phương trình bậc 2 $az^2 + bz + c = 0$ một ẩn z luôn luôn có *2* nghiệm (với $a \neq 0$ và tính luôn nghiệm bội).

Trang 236
Câu đố 158 e

Số phức có thể được sử dụng để mô tả các điểm trong một mặt phẳng. Một phép quay quanh gốc có thể được mô tả bằng một phép nhân cho một số phức có chiều dài đơn vị. Các đại lượng 2 chiều khác cũng có thể mô tả bằng số phức. Các kỹ sư điện sử dụng số phức để mô tả các đại lượng có phase, như dòng điện giao phiên hay điện trường trong không gian.

Cách viết số phức có chiều dài đơn vị là $\cos\theta + i\sin\theta$ là một phương pháp thuận lợi

Câu đố 159 e để nhớ công thức cộng góc. Vì ta có $\cos n\theta + i \sin n\theta = (\cos\theta + i \sin\theta)^n$, nên có thể dễ dàng suy ra $\cos 2\theta = \cos^2\theta - \sin^2\theta$ và $\sin 2\theta = 2 \sin\theta \cos\theta$. Ngoài ra, số phức đơn vị tạo Câu đố 160 e thành nhóm Lie SO(2)=U(1).

Mọi số phức đều có thể viết dưới dạng

$$z = re^{i\varphi} . \tag{123}$$

Dạng cực của số phức là lý do để giới thiệu nó đầu tiên. Góc φ được gọi là *phase*; số thực $r = |z|$ được gọi là *giá trị tuyệt đối* hay *modulus* hay *độ lớn*. Khi sử dụng để mô tả các dao động hay sóng, việc gọi r là *biên độ* là một điều có ý nghĩa. Hàm số mũ phức có chu kỳ $2\pi i$; nói cách khác, ta có

$$e^1 = e^{1+2\pi i} , \tag{124}$$

thể hiện tính chất mà ta muốn góc phase sở hữu.

Nếu ta sử dụng phương trình cuối 2 lần, ta có thể viết

$$e^1 = e^{1+2\pi i} = (e^{1+2\pi i})^{1+2\pi i} = e^{(1+2\pi i)(1+2\pi i)} = e^{1-4\pi^2+4\pi i} = e^{1-4\pi^2} . \tag{125}$$

Câu đố 161 e Ồ, điều đó có nghĩa là $\pi = 0$! Ở đây có điều gì sai?

Số phức cũng có thể được sử dụng để mô tả hình học phẳng Euclide. Phép quay, phép tĩnh tiến và các phép đẳng cự khác như phép phản chiếu, phép phản chiếu trượt và phép biến đổi theo tỷ lệ đều có thể được mô tả một cách dễ dàng bằng các toán tử đơn giản trên mặt phẳng phức biểu diễn toạ độ các điểm.

Cũng cần nói thêm là số phức cũng nhiều như số thực. Bạn chứng minh điều này Câu đố 162 s được không?

> Tình yêu thật phức tạp: nó có phần hiện thực và phần mộng ảo.
>
> Vô danh

Quaternion

Vị trí của các điểm trên một đường thẳng có thể được mô tả bằng số thực. Số phức có thể được sử dụng để mô tả vị trí của một điểm trong một mặt phẳng. Tự nhiên là ta sẽ muốn thử tổng quát hoá ý tưởng số vào không gian có nhiều chiều hơn. Tuy vậy, hoá ra là ta không thể định nghĩa một hệ thống số tiện lợi cho không gian *3 chiều*. Một hệ thống số mới, *quaternion*, có thể được tạo dựng tương ứng với các điểm trong không gian *4 chiều*, nhưng chỉ khi ta hy sinh tính giao hoán của phép nhân. Ta không thể định nghĩa một hệ thống số tiện lợi nào có chiều khác 1, 2 và 4.

Quaternion được nhiều toán gia khám phá vào thế kỷ 19, trong số đó có Hamilton,* người đã mất nhiều thời gian trong đời để nghiên cứu chúng. Đúng ra Thuyết điện động lực học của Maxwell đã được thiết lập theo quaternion trước khi vector 3 chiều được sử Xem 173 dụng.

* William Rowan Hamilton (b. 1805 Dublin, d. 1865 Dunsink), thần đồng toán học và toán gia nổi tiếng, đặt tên quaternion theo một câu nói trong Vulgate (Công vụ các sứ đồ. 12: 4).

Cùng với phép nhân, quaternion $\mathbb{H}$ tạo thành một đại số 4 chiều trên các số thực với cơ sở $1, i, j, k$ thoả

Quyển V, trang 359

·	1	i	j	k
1	1	i	j	k
i	i	-1	k	$-j$
j	j	$-k$	-1	i
k	k	j	$-i$	-1

(126)

Các hệ thức này thường được viết là $i^2 = j^2 = k^2 = -1$, $ij = -ji = k$, $jk = -kj = i$, $ki = -ik = j$. Các quaternion $1, i, j, k$ cũng được gọi là *các đơn vị cơ bản* hay *các phần tử sinh*. Việc không có sự đối xứng qua đường chéo của bảng cho thấy tính không giao hoán của phép nhân quaternion. Với quaternion, ý tưởng tích không giao hoán xuất hiện lần đầu tiên trong toán học. Tuy vậy, phép nhân quaternion *có tính* kết hợp. Do tính không giao hoán, các phương trình đa thức trong quaternion có nhiều lời giải hơn trong số phức: chỉ cần tìm tất cả lời giải của phương trình $X^2 + 1 = 0$ là bạn bị thuyết phục ngay.

Câu đố 163 s

Mỗi quaternion X có thể được viết dưới dạng

$$X = x_0 + x_1 i + x_2 j + x_3 k = x_0 + \boldsymbol{v} = (x_0, x_1, x_2, x_3) = (x_0, \boldsymbol{v}) \ , \tag{127}$$

trong đó x_0 được gọi là *phần vô hướng* và $\boldsymbol{v}$ là *phần vector*. Như vậy phép nhân được định nghĩa là $(x, \boldsymbol{v})(y, \boldsymbol{w}) = (xy - \boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{w}, x\boldsymbol{w} + y\boldsymbol{v} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{w})$. Phép nhân tổng quát của 2 quaternion là

$$(a_1, b_1, c_1, d_1)(a_2, b_2, c_2, d_2) = (a_1 a_2 - b_1 b_2 - c_1 c_2 - d_1 d_2 \ , \ a_1 b_2 + b_1 a_2 + c_1 d_2 - d_1 c_2,$$
$$a_1 c_2 - b_1 d_2 + c_1 a_2 + d_1 b_2, a_1 d_2 + b_1 c_2 - c_1 b_2 + d_1 a_2) \ . \tag{128}$$

Quaternion liên hợp $\overline{X}$ được định nghĩa là $\overline{X} = x_0 - \boldsymbol{v}$, sao cho $\overline{XY} = \overline{Y}\ \overline{X}$. *Chuẩn* $|X|$ của một quaternion X được định nghĩa là $|X|^2 = X\overline{X} = \overline{X}X = x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = x_0^2 + \boldsymbol{v}^2$. Chuẩn có nhân tính, tức là $|XY| = |X|\ |Y|$.

Khác với số phức, mỗi quaternion liên hệ với liên hợp phức của nó theo công thức

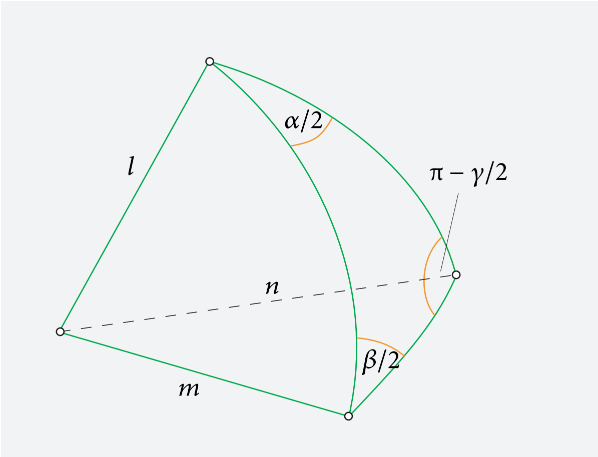
$$\overline{X} = -\tfrac{1}{2}(X + iXi + jXj + kXk) \ . \tag{129}$$

Trong số phức không có mối liên hệ kiểu này. Theo ngôn ngữ vật lý, một số phức và liên hợp của nó là các biến độc lập; đối với quaternion thì không đúng như vậy. Kết quả là trong vật lý, các hàm của quaternion ít hữu dụng hơn các hàm của số phức.

Hệ thức $|XY| = |X|\ |Y|$ dẫn tới *định lý 4 bình phương*

$$\begin{aligned}
&(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2)(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + b_4^2) \\
&= (a_1 b_1 - a_2 b_2 - a_3 b_3 - a_4 b_4)^2 + (a_1 b_2 + a_2 b_1 + a_3 b_4 - a_4 b_3)^2 \\
&+ (a_1 b_3 + a_3 b_1 + a_4 b_2 - a_2 b_4)^2 + (a_1 b_4 + a_4 b_1 + a_2 b_3 - a_3 b_2)^2
\end{aligned} \tag{130}$$

đúng cho mọi số thực a_i và b_i, và cũng đúng cho mọi tập hợp 8 số nguyên. Năm 1748 Leonhard Euler (1707–1783) khi cố gắng chứng minh rằng mỗi số nguyên là tổng của 4



HÌNH 88 Tổ hợp của các phép quay.

bình phương đã khám phá công thức này. (Sự kiện sau chỉ được Joseph Lagrange chứng minh vào năm 1770.)

Hamilton đã nghĩ rằng một quaternion với phần vô hướng bằng 0, mà ông đơn giản gọi là *vector* (một thuật ngữ do ông phát minh), có thể được xác định bằng một vector của phép tĩnh tiến trong không gian 3 chiều thông thường; nhưng điều này không đúng. Một quaternion như vậy bây giờ được gọi là một quaternion *thuần*, hay *thuần nhất*, hay *ảo*. Tích của 2 quaternion thuần $V = (0, \boldsymbol{v})$ và $W = (0, \boldsymbol{w})$ được cho bởi công thức $VW = (-\boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{w}, \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{w})$, trong đó · ký hiệu tích vô hướng và × ký hiệu tích vector. Cần chú ý rằng một quaternion bất kỳ có thể được viết là thương của 2 quaternion thuần.

Trong thực tế, một quaternion thuần $(0, \boldsymbol{v})$ không hành xử như một vector của phép tĩnh tiến; đúng ra một quaternion thuần biểu diễn một *phép quay* một góc π hay 180° quanh trục có hướng $\boldsymbol{v} = (v_x, v_y, v_z)$.

Câu đố 164 ny

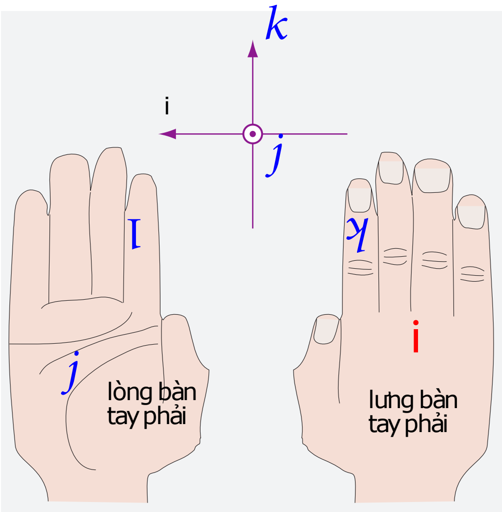
Hoá ra trong không gian 3 chiều, một phép quay *tổng quát* quanh điểm gốc có thể được mô tả bằng một quaternion Q *đơn vị* còn được gọi là quaternion *chuẩn*, có $|Q| = 1$. Một quaternion như vậy có thể được viết là $(\cos\theta/2, \boldsymbol{n}\sin\theta/2)$, trong đó $\boldsymbol{n} = (n_x, n_y, n_z)$ là vector chuẩn mô tả hướng của trục quay và θ là góc quay. Một quaternion đơn vị như $Q = (\cos\theta/2, \boldsymbol{n}\sin\theta/2)$ sẽ quay một quaternion thuần $V = (0, \boldsymbol{v})$ thành một quaternion thuần khác $W = (0, \boldsymbol{w})$ được cho bởi biểu thức

$$W = QVQ^* . \qquad (131)$$

Như vậy, nếu ta sử dụng các quaternion thuần như V hay W để mô tả vị trí, ta có thể sử dụng quaternion đơn vị để mô tả phép quay và tính toán sự thay đổi toạ độ. Việc ghép 2 phép quay sẽ là tích của các quaternion đơn vị tương ứng. Thật vậy, một phép quay một góc α quanh trục $\boldsymbol{l}$ rồi đến một phép quay một góc β quanh trục $\boldsymbol{m}$ cho kết quả là một phép quay một góc γ quanh trục $\boldsymbol{n}$, với các giá trị được xác định bởi

$$(\cos\gamma/2, \sin\gamma/2\boldsymbol{n}) = (\cos\beta/2, \sin\beta/2\boldsymbol{m})(\cos\alpha/2, \sin\alpha/2\boldsymbol{l}) . \qquad (132)$$

Có một cách biểu diễn kết quả bằng hình ảnh được cho trong Hình 88. Bằng cách vẽ



HÌNH 89 Lòng và lưng của bàn tay phải và các quaternion.

một tam giác lên một hình cầu đơn vị và chú ý hệ số 1/2 trong các góc, tổ hợp 2 phép quay có thể được xác định một cách đơn giản.

Việc diễn dịch các quaternion thành phép quay cũng được minh hoạ, theo một cách hơi khác một chút, trong chuyển động của một bàn tay bất kỳ. Để thấy rõ điều này bạn hãy lấy một bút nỉ viết các chữ 1, i, j và k lên bàn tay như đã thấy trong Hình 89. Xác định 3 trục quay 180° như trong hình vẽ và xem việc ghép nối là phép nhân, còn chuyển động bàn tay phải thì theo đúng những 'quy luật' như quy luật của quaternion đơn vị thuần. (Ta cần phân biệt $+i$ và $-i$, và điều tương tự đối với các đơn vị khác, bằng chiều vặn của cánh tay. Và kết quả của phép nhân là chữ mà người đối diện với bạn có thể đọc được.) Bạn có thể chứng tỏ rằng $i^2 = j^2 = k^2 = -1$, $i^4 = 1$, phù hợp với các hệ thức quaternion khác. Mô hình cũng cho ta thấy rằng góc quay của cánh tay bằng nửa góc quay của quaternion tương ứng. Nói cách khác, ta có thể sử dụng quaternion để mô tả thủ thuật dây nịt, nếu phép nhân VW của 2 quaternion được xem như phép quay V được thực hiện *sau* phép quay W. Quaternion, giống như bàn tay người, sẽ hành xử như hạt có spin 1/2. Quaternion và spinor thì đẳng cấu với nhau.

Xem 174
Câu đố 165 e
Câu đố 166 s
Trang 131

Lý do cho tính chất quay nửa góc có thể được xác định một cách chính xác hơn bằng cách sử dụng ngôn ngữ toán học. Các phép quay trong không gian 3 chiều quanh 1 điểm tạo thành 'nhóm trực giao đặc biệt' trong không gian 3 chiều, và được gọi là SO(3). Nhưng chuyển động của bàn tay gắn liền với vai thông qua cánh tay tạo thành một nhóm khác, đẳng cấu với nhóm Lie SU(2). Sự khác biệt này bắt nguồn từ sự xuất hiện của nửa góc trong việc tham số hoá phép quay; thật vậy, sự tham số hoá ở trên làm cho một phép quay 2π tương ứng với phép nhân với -1. Chỉ trong thế kỷ 20 người ta mới hiểu rằng có các biến động lực vật lý cơ bản hành xử giống bàn tay nối với cánh tay: chúng được gọi là *spinor*. Chi tiết về spinor có thể tìm thấy trong phần nói về đối xứng hoán vị, nơi các dây đai đã được sử dụng tương tự như cánh tay. Tóm lại, nhóm SU(2) được tạo thành từ các quaternion đơn vị là *cái phủ kép* của nhóm SO(3).

Quyển V, trang 370
Trang 131
Xem 175

Cách biểu diễn đơn giản của các phép quay và vị trí bằng quaternion được sử dụng trong các chương trình máy tính trong robotics, trong Thiên văn và trong mô phỏng các

chuyến bay. Trong phần mềm được sử dụng để tạo ra ảnh 3 chiều và phim hoạt hình, phần mềm hiển thị hình ảnh, quaternion thường được sử dụng để tính toán đường đi của các tia sáng được phản xạ lặp, tạo cho các mặt một bề ngoài hiện thực.

Đại số quaternion là cấu trúc có tính kết hợp, không giao hoán, có chuẩn, số chiều hữu hạn, có phần tử đơn vị trên trường số thực. Quaternion tạo thành một trường không giao hoán, tức là trường lệch, trong đó phần tử nghịch đảo của quaternion X là $\overline{X}/|X|$. Do đó ta có thể định nghĩa phép chia quaternion (hãy cẩn thận phân biệt XY^{-1} và $Y^{-1}X$). Quaternion đã tạo thành một *đại số thương*. Đúng ra chỉ có quaternion $\mathbb{H}$, số phức $\mathbb{C}$ và số thực $\mathbb{R}$ là 3 đại số thương kết hợp hữu hạn chiều. Nói cách khác, trường không giao hoán quaternion là đại số không giao hoán kết hợp thực hữu hạn chiều duy nhất không có ước của 0. *Tâm* của các quaternion, tức là tập hợp các quaternion giao hoán với mọi quaternion khác, chỉ là tập hợp các số thực.

Quaternion có thể được biểu diễn bằng matrix có dạng

$$\begin{pmatrix} A & B \\ -B^* & A^* \end{pmatrix} \quad \text{với} \quad A, B \in \mathbb{C} \quad \text{tức là} \quad A = a + ib, B = c + id \;, \qquad (133)$$

hay viết cách khác là

$$\begin{pmatrix} a & b & c & d \\ -b & a & -d & c \\ -c & d & a & -b \\ -d & -c & b & a \end{pmatrix} \quad \text{với} \quad a, b, c, d \in \mathbb{R} \;, \qquad (134)$$

trong đó quaternion X chính là $X = A + Bj = a + ib + jc + kd$. Phép cộng và nhân matrix tương ứng với phép cộng và nhân quaternion.

Các phần tử sinh của quaternion là

$$1 : \sigma_0 \quad , \quad i : -i\sigma_1 \quad , \quad j : -i\sigma_2 \quad , \quad k : -i\sigma_3 \qquad (135)$$

trong đó σ_n là matrix spin Pauli.*

Các biểu diễn 4×4 thực không phải là duy nhất, như biểu diễn

$$\begin{pmatrix} a & b & -d & -c \\ -b & a & -c & d \\ d & c & a & b \\ c & -d & -b & a \end{pmatrix} \qquad (137)$$

đã cho ta thấy. Không có biểu diễn quaternion bằng các matrix 3×3.

---

* *Matrix spin Pauli* là các matrix Hermite phức

$$\sigma_0 = \mathbf{1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad , \quad \sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad , \quad \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad , \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \qquad (136)$$

tất cả đều có giá trị riêng là ± 1; chúng thoả mãn các hệ thức $[\sigma_i, \sigma_k]_+ = 2\,\delta_{ik}$ và $[\sigma_i, \sigma_k] = 2i\,\varepsilon_{ikl}\,\sigma_l$. Tổ hợp tuyến tính $\sigma_\pm = \frac{1}{2}(\sigma_1 \pm \sigma_2)$ cũng thường được sử dụng. Các biểu diễn quaternion khả hữu khác là $i : i\sigma_3, j : i\sigma_2, k : i\sigma_1$.

Các matrix này chứa các phần tử thực và phức, nên không có vấn đề gì. Trái lại, khi tạo ra các matrix với các phần tử quaternion ta cần cẩn thận vì phép nhân quaternion không giao hoán, vì vậy những hệ thức đơn giản như trAB = trBA *không còn* đúng một cách tổng quát nữa.

Ta có thể học được điều gì về việc mô tả thiên nhiên bằng quaternion? Trước hết, ta thấy rằng các phép quay nhị nguyên giống nhau về vị trí và giống với phép tĩnh tiến: tất cả đều được biểu diễn bằng vector 3 chiều. Phép quay có phải là phép toán cơ bản của thiên nhiên không? Phép tĩnh tiến có phải là 'cái bóng' duy nhất của phép quay không? Mối liên hệ giữa phép tĩnh tiến và phép quay sẽ được nghiên cứu trong quyển cuối cùng trong cuộc hành trình lên đỉnh.

Quyển VI, trang 174

Quyển III, trang 77

Xem 173

Câu đố 167 s

Khi Maxwell viết ra các phương trình Điện động lực học, ông đã sử dụng ký hiệu quaternion. (Sau này Hertz và Heaviside đã đưa ra ký hiệu vector 3 chiều thông thường như hiện nay.) Các phương trình có thể được viết theo nhiều cách khác nhau bằng cách sử dụng quaternion. Nhưng cách đơn giản nhất là khi ta giữ sự phân biệt giữa $\sqrt{-1}$ và các đơn vị i, j, k của quaternion. Lúc đó ta có thể viết toàn bộ Điện động lực học vào trong một phương trình đơn giản:

$$\mathrm{d}F = -\frac{Q}{\varepsilon_0} \tag{138}$$

trong đó F là điện từ trường tổng quát hoá và Q là điện tích tổng quát hoá. Các đại lượng này được xác định bởi các biểu thức

$$\begin{aligned} F &= E + \sqrt{-1}\,cB \\ E &= iE_x + jE_y + kE_z \\ B &= iB_x + jB_y + kB_z \\ \mathrm{d} &= \delta + \sqrt{-1}\,\partial_t/c \\ \delta &= i\partial_x + j\partial_y + k\partial_z \\ Q &= \rho + \sqrt{-1}\,J/c \end{aligned} \tag{139}$$

trong đó các trường E và B và các phân bố điện tích ρ và J có ý nghĩa như thường lệ. Nội dung của phương trình (138) đối với điện từ trường cũng giống như công thức thông thường.

Dù có tính chất 4 chiều và vẻ ngoài duyên dáng, quaternion hình như vẫn chưa được thuận tiện cho mục đích nâng cấp Thuyết tương đối đặc biệt; lý do chính là vấn đề dấu của các biểu thức trong chuẩn của chúng. Do đó, Thuyết tương đối và không-thời gian vẫn thường được mô tả bằng cách sử dụng số thực. Và cho dù quaternion có hữu dụng đi nữa, chúng cũng không giúp cho ta hiểu thêm nhiều về vật lý và thiên nhiên.

Octonion

Theo cách tạo dựng quaternion từ số phức, ta cũng có thể tạo dựng *octonion* từ quaternion. Chúng được Arthur Cayley (1821–1895) nghiên cứu lần đầu tiên. Dưới tác dụng của phép nhân, *octonion* (hay *octave*) là các phần tử của một đại số 8 chiều trên số

thực với các phần tử sinh $1, i_n$ trong đó $n = 1 \dots 7$ theo đúng bảng sau

$\cdot$	1	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7
1	1	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7
i_1	i_1	-1	i_3	$-i_2$	i_5	$-i_4$	i_7	$-i_6$
i_2	i_2	$-i_3$	-1	i_1	$-i_6$	i_7	i_4	$-i_5$
i_3	i_3	i_2	$-i_1$	-1	i_7	i_6	$-i_5$	$-i_4$
i_4	i_4	$-i_5$	i_6	$-i_7$	-1	i_1	$-i_2$	i_3
i_5	i_5	i_4	$-i_7$	$-i_6$	$-i_1$	-1	i_3	i_2
i_6	i_6	$-i_7$	$-i_4$	i_5	i_2	$-i_3$	-1	i_1
i_7	i_7	i_6	i_5	i_4	$-i_3$	$-i_2$	$-i_1$	-1

(140)

Đúng ra có đến 479 bảng nhân tương đương khác. Cấu trúc đại số này được gọi là *đại số Cayley*; nó có một phần tử đơn vị và một phép chia duy nhất. Đại số này không giao hoán và cũng không kết hợp. Tuy vậy nó có tính *giao phiên*, nghĩa là đối với mọi phần tử x và y, ta có $x(xy) = x^2 y$ và $(xy)y = xy^2$: một tính chất có phần yếu hơn tính kết hợp. Nó là đại số giao phiên thực 8 chiều không có ước của 0 duy nhất. Vì không có tính kết hợp, tập hợp $\mathbb{O}$ của tất cả octonion không tạo thành một trường hay một vành, vì vậy phần thiết kế cũ của 'số Cayley' đã bị bỏ đi. Octonion là 'số' siêu phức tổng quát nhất có chuẩn có nhân tính. Các phần tử sinh của nó tuân theo hệ thức $(i_n i_m) i_l = \pm i_n (i_m i_l)$, trong đó dấu trừ biểu diễn tính không kết hợp, đúng với mọi tổ hợp chỉ số không có tính chất quaternion, như 1-2-4.

Octonion có thể được biểu diễn bằng matrix có dạng

$$\begin{pmatrix} A & B \\ -\bar{B} & \bar{A} \end{pmatrix} \text{ trong đó } A, B \in \mathbb{H}\,, \quad \text{hay là matrix } 8 \times 8 \text{ thực.} \qquad (141)$$

Phép nhân matrix cho cùng kết quả với phép nhân octonion.

Hệ thức $|wz| = |w|\,|z|$ cho phép ta suy ra *định lý 8 bình phương* đầy ấn tượng

$$\begin{aligned}
&(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + a_5^2 + a_6^2 + a_7^2 + a_8^2)(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + b_4^2 + b_5^2 + b_6^2 + b_7^2 + b_8^2)\\
&\quad = (a_1 b_1 - a_2 b_2 - a_3 b_3 - a_4 b_4 - a_5 b_5 - a_6 b_6 - a_7 b_7 - a_8 b_8)^2\\
&\quad + (a_1 b_2 + a_2 b_1 + a_3 b_4 - a_4 b_3 + a_5 b_6 - a_6 b_5 + a_7 b_8 - a_8 b_7)^2\\
&\quad + (a_1 b_3 - a_2 b_4 + a_3 b_1 + a_4 b_2 - a_5 b_7 + a_6 b_8 + a_7 b_5 - a_8 b_6)^2\\
&\quad + (a_1 b_4 + a_2 b_3 - a_3 b_2 + a_4 b_1 + a_5 b_8 + a_6 b_7 - a_7 b_6 - a_8 b_5)^2\\
&\quad + (a_1 b_5 - a_2 b_6 + a_3 b_7 - a_4 b_8 + a_5 b_1 + a_6 b_2 - a_7 b_3 + a_8 b_4)^2\\
&\quad + (a_1 b_6 + a_2 b_5 - a_3 b_8 - a_4 b_7 - a_5 b_2 + a_6 b_1 + a_7 b_4 + a_8 b_3)^2\\
&\quad + (a_1 b_7 - a_2 b_8 - a_3 b_5 + a_4 b_6 + a_5 b_3 - a_6 b_4 + a_7 b_1 + a_8 b_2)^2\\
&\quad + (a_1 b_8 + a_2 b_7 + a_3 b_6 + a_4 b_5 - a_5 b_4 - a_6 b_3 - a_7 b_2 + a_8 b_1)^2 \qquad (142)
\end{aligned}$$

đúng với mọi số thực a_i và b_i và đặc biệt với mọi số nguyên. (Có nhiều biến thể của biểu thức này, với các tổ hợp dấu khác nhau.) Định lý được Carl Ferdinand Degen (1766–1825)

khám phá năm 1818 và được John Graves năm 1844 và Arthur Cayley năm 1845 khám phá lại. Không có sự tổng quát hoá lên số bình phương cao hơn, như Adolf Hurwitz (1859–1919) đã chứng minh năm 1898.

Octonion có thể được sử dụng để chứng minh rằng tích vector có thể được định nghĩa với số chiều nhiều hơn 3. *Tích vector* hay *tích chéo* là một phép toán × thoả các biểu thức

$$u \times v = -v \times u \quad \textit{tính phản giao hoán}$$
$$(u \times v)\, w = u\,(v \times w) \quad \textit{luật hoán đổi.} \tag{143}$$

Sử dụng định nghĩa

$$X \times Y = \frac{1}{2}(XY - YX)\,, \tag{144}$$

Tích vector của các quaternion ảo, tức là các quaternion kiểu $(0, \boldsymbol{u})$, cũng ảo và tương ứng với tích vector 3 chiều thông thường, và như vậy cũng thoả mãn (143). Điều thú vị là ta có thể sử dụng định nghĩa (144) cho *octonion*. Trong trường hợp đó, tích các octonion ảo cũng là ảo và (143) cũng đúng. Đúng ra đây là thí dụ không tầm thường duy nhất của tích vector.

Xem 171

Tóm lại: *Tích vector chỉ có trong không gian 3 và 7 chiều.* Nhiều học giả đã giả định là điều này có liên hệ với tính 10 chiều của thiên nhiên; tuy vậy, các suy đoán này chưa gặt hái được sự thành công nào.

Sự đối xứng của lực trong thiên nhiên dẫn tới một câu hỏi nổi tiếng. Số phức đơn vị là của nhóm Lie U(1) và quaternion đơn vị là của nhóm Lie SU(2). Có octonion đơn vị tạo thành nhóm Lie SU(3) không?

Câu đố 168 s

Các loại số khác

Quá trình tạo dựng các hệ 'số' siêu phức hay các đại số thực mới bằng cách 'nhân đôi' hệ đã có, có thể tiếp tục mãi mãi. Tuy vậy, octonion, *sedenion* và tất cả hệ nhân đôi sau đây không phải là vành hay trường mà chỉ là các đại số không giao hoán có phần tử đơn vị. Ta cũng có thể định nghĩa các đại số hữu hạn chiều khác có phần tử đơn vị trên số thực, từng được gọi là 'số' siêu phức: chúng gồm có 'số đối ngẫu', 'số kép', 'số Clifford–Lifshitz' v.v... nhưng vô dụng trong Vật lý.

Các toán gia cũng đã định nghĩa các trường số có '1 và 1 bit' chiều như các trường số đại số. Cũng có sự tổng quát hoá khái niệm số nguyên vào miền phức: *số nguyên Gauss*, được định nghĩa là $n + im$, trong đó n và m là các số nguyên thông thường. Gauss cũng đã định nghĩa số mà bây giờ ta gọi là *số nguyên tố Gauss*. (Bạn có thể tìm ra nguyên do không?) Chúng không được sử dụng trong việc mô tả thiên nhiên nhưng lại quan trọng trong Lý thuyết số, lĩnh vực tìm hiểu các tính chất của số nguyên.

Xem 176
Câu đố 169 s

Các vật lý gia thường gọi các toán tử cơ lượng tử là 'số q.' Nhưng thuật ngữ này nay đã hết thời.

Còn một hướng khác là mở rộng số tự nhiên bao gồm luôn các số lớn hơn vô hạn. Các lớp *số siêu hạn* quan trọng nhất là *số thứ tự*, *số đếm* và *số siêu thực*. Số thứ tự là sự mở rộng quan trọng của số nguyên ra vô tận, trong khi số siêu thực là sự mở rộng liên tục của số thực ra vô tận. Nói một cách lỏng lẻo, số thứ tự trong số siêu hạn có vai trò tương tự như số nguyên trong số thực; số siêu thực lấp đầy các khoảng trống của số thứ

Xem 177
Quyển III, trang 292

tự, giống như số thực đối với số nguyên. Điều thú vị là nhiều chuỗi số phân kỳ trong ℝ nhưng lại hội tụ trong số siêu thực. Bạn có thể tìm ra một thí dụ không?

Câu đố 170 ny

Số siêu thực bao gồm các số vô cùng nhỏ, giống như các số của *giải tích phi chuẩn*, còn được gọi là *số siêu siêu thực - hyperreal*. Trong cả 2 hệ thống số, khác với số thực, số 1 và 0.999 999... (trong đó chuỗi số 9 là vô hạn nhưng được xem là siêu hữu hạn - hyperfinite) không trùng nhau mà tách rời nhau bởi một số lượng vô hạn các số khác. Trước kia ta đã tìm hiểu các số siêu thực. Các số phi chuẩn có thể được sử dụng để xác định các số vô cùng nhỏ trong các phép tính vi tích phân, ngay trong chương trình trung học.

Xem 171

Quyển III, trang 294

Xem 172

Từ không gian vector tới không gian Hilbert

Không gian vector còn được gọi là *không gian tuyến tính*, là sự tổng quát hoá toán học các tính chất của không gian 3 chiều trực giác. Một tập hợp các phần tử mà 2 phần tử bất kỳ của nó có thể cộng với nhau và một phần tử bất kỳ của nó có thể nhân với một số được gọi là một không gian vector, nếu kết quả thuộc tập hợp đó và các luật tính toán thông thường được nghiệm đúng.

Nói chính xác hơn, một *không gian vector* trên một trường số K là một tập hợp các phần tử được gọi là *vector*, khi có một phép cộng vector và một *phép nhân với một số vô hướng* được định nghĩa sao cho đối với tất cả các vector a, b, c và tất cả các số s và r của K, ta có

$$
\begin{aligned}
(a+b)+c = a+(b+c) &= a+b+c && \text{tính kết hợp của phép cộng vector} \\
n+a &= a && \text{sự hiện hữu của vector không} \\
(-a)+a &= n && \text{sự hiện hữu của vector đối} \\
1a &= a && \text{tính chính quy của phép nhân với số vô hướng} \\
(s+r)(a+b) &= sa+sb+ra+rb && \text{tính phân bố đầy đủ của phép nhân vô hướng}
\end{aligned} \tag{145}
$$

Nếu trường K, có các phần tử được gọi là *số vô hướng* theo ngữ cảnh này, được lấy làm số thực (hay số phức hay quaternion), người ta đang nói về không gian vector thực (phức hay quaternion). Không gian vector còn được gọi là *không gian vector tuyến tính* hay đơn giản là *không gian tuyến tính*.

Số phức, tập hợp các hàm số thực được định nghĩa trên đường thẳng thực, tập hợp của mọi đa thức, tập hợp các matrix với số hàng và cột đã cho, đều tạo thành không gian vector. Trong toán học, vector là một khái niệm tổng quát hơn trong vật lý. (Không gian vector toán học khả hữu đơn giản nhất là gì?)

Câu đố 171 s

Trong vật lý thuật ngữ ‘vector’ được dành riêng cho các phần tử của một loại không gian vector được chuyên biệt hoá hơn, cụ thể là không gian nội tích có chuẩn. Để định nghĩa không gian này, trước tiên ta cần khái niệm không gian metric.

Không gian metric là một tập hợp có một metric - là cách định nghĩa khoảng cách

giữa các phần tử. Một hàm số thực $d(a, b)$ giữa các phần tử được gọi là một metric nếu

$$\begin{aligned} d(a,b) \geqslant 0 \quad & \textit{tính dương của metric} \\ d(a,b) + d(b,c) \geqslant d(a,c) \quad & \textit{bất đẳng thức tam giác} \\ d(a,b) = 0 \quad \text{nếu và chỉ nếu} \quad a = b \quad & \textit{tính chính quy của metric} \end{aligned} \tag{146}$$

Sau đây là một thí dụ không tầm thường. Ta định nghĩa một khoảng cách đặc biệt d giữa 2 thành phố. Nếu 2 thành phố nằm trên một đường thẳng đi qua Paris, ta sử dụng khoảng cách thông thường. Trong các trường hợp khác, ta định nghĩa khoảng cách d là khoảng cách ngắn nhất từ thành phố này sang thành phố kia có đi qua Paris. Phương pháp định nghĩa kỳ lạ này xác định một metric giữa các thành phố ở Pháp, được gọi là *khoảng cách theo đường sắt Pháp*.

Câu đố 172 s

Một không gian vector *có chuẩn* là một không gian tuyến tính có một chuẩn, hay 'chiều dài', liên kết với một vector. *Chuẩn* là một số không âm $\|a\|$ được định nghĩa cho mỗi vector a với các tính chất sau

$$\begin{aligned} \|ra\| = |r|\ \|a\| \quad & \textit{tính tuyến tính của chuẩn} \\ \|a+b\| \leqslant \|a\| + \|b\| \quad & \textit{bất đẳng thức tam giác} \\ \|a\| = 0 \quad \text{nếu} \quad a = 0 \quad & \textit{tính chính quy} \end{aligned} \tag{147}$$

Câu đố 173 ny

Thường có nhiều cách để định nghĩa chuẩn của một không gian vector. Cũng nên chú ý là chuẩn luôn luôn có thể được sử dụng để định nghĩa một metric bằng cách đặt

$$d(a,b) = \|a - b\| \tag{148}$$

vì vậy mọi không gian có chuẩn đều là không gian metric. Đây là định nghĩa khoảng cách *tự nhiên* (khác với cách không tự nhiên như định nghĩa khoảng cách giữa hai thành phố Pháp ở trên).

Chuẩn thường được định nghĩa với sự giúp đỡ của nội tích. Thật vậy, lớp không gian tuyến tính đặc biệt nhất là *các không gian nội tích*. Đây là các không gian vector có một *nội tích*, còn gọi là *tích vô hướng* · (đừng nhầm với phép nhân với số vô hướng!) liên kết một số với một cặp vector. Một không gian nội tích trên $\mathbb{R}$ thoả các điều sau

$$\begin{aligned} a \cdot b = b \cdot a \quad & \textit{tính giao hoán của tích vô hướng} \\ (ra)\cdot(sb) = rs(a\cdot b) \quad & \textit{tính song tuyến tính của tích vô hướng} \\ (a+b)\cdot c = a\cdot c + b\cdot c \quad & \textit{tính phân bố trái của tích vô hướng} \\ a\cdot(b+c) = a\cdot b + a\cdot c \quad & \textit{tính phân bố phải của tích vô hướng} \\ a\cdot a \geqslant 0 \quad & \textit{tính dương của tích vô hướng} \\ a\cdot a = 0 \quad \text{nếu và chỉ nếu} \quad a = 0 \quad & \textit{tính chính quy của tích vô hướng} \end{aligned} \tag{149}$$

đối với mọi vector a, b, c và mọi số vô hướng r, s. Một không gian nội tích *thực* có số chiều hữu hạn còn được gọi là một không gian vector *Euclide*. Tập hợp mọi vận tốc, vị trí, hay các động lượng khả hữu tạo thành một không gian như vậy.

Một không gian nội tích trên $\mathbb{C}$ thoả các điều sau *

$$\begin{aligned}
a \cdot b = \overline{b \cdot a} = \overline{b} \cdot \overline{a} & \quad \textit{tính Hermite} \\
(ra) \cdot (sb) = r\overline{s}(a \cdot b) & \quad \textit{tính tuyến tính 3/2 của tích vô hướng} \\
(a+b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c & \quad \textit{tính phân bố trái của tích vô hướng} \\
a \cdot (b+c) = a \cdot b + a \cdot c & \quad \textit{tính phân bố phải của tích vô hướng} \\
a \cdot a \geqslant 0 & \quad \textit{tính dương của tích vô hướng} \\
a \cdot a = 0 \quad \text{nếu và chỉ nếu} \quad a = 0 & \quad \textit{tính chính quy của tích vô hướng}
\end{aligned} \tag{150}$$

đối với mọi vector a, b, c và mọi số vô hướng r, s. Một không gian nội tích *phức* (có số chiều hữu hạn) còn được gọi là không gian vector *đơn nguyên* hay *Hermite*. Nếu không gian nội tích có tính *đầy đủ*, đặc biệt là trong trường hợp phức vô hạn chiều, thì nó được gọi là *không gian Hilbert*. Không gian của mọi trạng thái khả hữu của một hệ lượng tử tạo thành một không gian Hilbert. Trang 225

Một không gian nội tích cũng là không gian metric và vì vậy nó là không gian có chuẩn nếu metric được xác định bởi biểu thức

$$d(a,b) = \sqrt{(a-b)\cdot(a-b)}\,. \tag{151}$$

Chỉ trong ngữ cảnh của không gian nội tích ta mới có thể nói về góc (hay hiệu phase) giữa các vector, như ta đã sử dụng trong Vật lý. Dĩ nhiên là giống như trong không gian có chuẩn, không gian nội tích cũng cho phép ta nói về chiều dài của vector và định nghĩa một *cơ sở*, là khái niệm toán học mà ta cần để định nghĩa một hệ toạ độ. Không gian vector hay không gian nội tích nào quan trọng trong vật lý? Câu đố 174 s

Số chiều của một không gian vector là số vector cơ sở độc lập tuyến tính. Bạn có thể xác định một cách chính xác số chiều này hay không? Câu đố 175 s

Một *không gian Hilbert* là một không gian nội tích thực hay phức mà cũng là một không gian metric *đầy đủ*. Nói cách khác, trong một không gian Hilbert, khoảng cách thay đổi liên tục và hành xử đúng như ta tiên đoán. Không gian Hilbert thường, nhưng không luôn luôn, có số chiều vô hạn.

Định nghĩa của không gian Hilbert và không gian vector đã giả sử là ta bắt đầu với các tập hợp liên tục. Nếu thiên nhiên không liên tục thì người ta có thể sử dụng các khái niệm nào? Câu đố 176 s

Các bài toán vui và lạ

Toán học cho ta nhiều kết quả phản trực giác. Việc đọc một quyển sách có uy tín về chủ đề này như quyển sách của Bernard R. Gelbaum và John M. H. Olmsted, *Theorems and Counter-examples in Mathematics*, Springer/,1993„ có thể giúp bạn rèn luyện tư duy và thưởng thức được vẻ đẹp của toán học một cách trọn vẹn hơn.

* *

Ta có thể vẽ một đường cong gặp mọi điểm trong một hình vuông hay mọi điểm trong

* Có hai dạng không tương đương của tiên đề tuyến tính 3/2. Dạng khác là $(ra)\cdot(sb) = \overline{r}s(a\cdot b)$. Thuật ngữ *tuyến tính 3/2* có gốc từ tiếng Latin và có nghĩa là 'tuyến tính một rưỡi'.

một hình lập phương. Điều này được chứng minh trong sách của Hans Sagan, *Space Filling Curves*,, Springer Verlag 1994.. Kết quả là sự phân biệt giữa 1, 2, 3 chiều trong không gian bị nhoè đi trong toán học thuần tuý. Tuy vậy trong vật lý, số chiều được xác định rất rõ ràng; mọi vật trong thiên nhiên đều có 3 chiều.

Câu đố 177 e

* *

Câu đố 178 ny

Chứng minh rằng hai toán tử A và B đều tuân theo hệ thức

$$\begin{aligned} \mathrm{e}^A \mathrm{e}^B = \exp(&A + B + \frac{1}{2}[A,B] \\ &+ \frac{1}{12}[[A,B],B] - \frac{1}{12}[[A,B],A] \\ &- \frac{1}{48}[B,[A,[A,B]]] - \frac{1}{48}[A,[B,[A,B]]] \\ &+ \ldots) \end{aligned} \tag{152}$$

đối với đa số các toán tử A và B. Kết quả này thường được gọi là *công thức Baker–Campbell–Hausdorff* hay *công thức BCH*.

Gợi ý và lời giải các câu đố

> Đừng bao giờ tính toán trước khi bạn biết câu trả lời.
>
> Phương châm của John Wheeler

Câu đố 1, trang 10: Đừng vội vã đòi hỏi khắt khe. Ấn bản kế tiếp của sách sẽ được lợi vì điều này.

Câu đố 2, trang 16: Vật lý cổ điển không giải thích được tính chất của vật chất như màu sắc hay sự mềm mại. Các tính chất của vật chất là kết quả của sự tương tác của thiên nhiên; chúng chắc chắn mang tính lượng tử. Để giải thích tính chất của vật chất ta phải sử dụng khái niệm hạt và các tính chất lượng tử của chúng.

Câu đố 3, trang 18: Vật lý cổ điển cho phép các biến động lực thay đổi *liên tục* theo thời gian. Trong vật lý cổ điển các đại lượng vật lý đo được không có giá trị cực tiểu.

Câu đố 4, trang 20: Khối lượng càng lớn, độ mờ của chuyển động do lượng tử tác dụng gây ra càng nhỏ, vì tác dụng = khối lượng x tốc độ x khoảng cách: khối lượng lớn thì độ biến thiên của tốc độ và khoảng cách sẽ nhỏ.

Câu đố 5, trang 20: Thời gian đơn giản nhất là $\sqrt{G\hbar/c^5}$. Hiển nhiên là hệ số sau này sẽ thay đổi. Khi sử dụng $4G$ thay vì G thời gian sẽ trở thành thời gian ngắn nhất có thể đo được trong thiên nhiên.

Câu đố 6, trang 21: Điện tích electron khá đặc biệt đối với tương tác điện từ; nó không được tính đến trong tương tác hạt nhân hay hấp dẫn. Điểm không rõ ràng ở đây là tại sao việc định nghĩa chiều dài theo điện tích e lại quan trọng đối với các hệ trung hoà và chân không. Mặt khác, lượng tử tác dụng $\hbar$ luôn luôn đúng đối với *mọi* tương tác và *mọi* phép đo.

Hơn nữa ta có thể lý luận rằng hai tuỳ chọn để định nghĩa chiều dài cơ bản – theo lượng tử tác dụng và theo lượng tử điện tích – thì không khác nhau nhiều: hệ thức giữa điện tích e và lượng tử tác dụng là $e = \sqrt{4\pi\varepsilon_0 \alpha c\hbar}$. Hai thang đo chiều dài được định nghĩa theo hai tuỳ chọn này chỉ sai khác một hệ số gần bằng 11.7. Đúng ra cả hai đều là thang đo *lượng tử*.

Câu đố 7, trang 21: Chỉ xét về mặt thứ nguyên thì bán kính nguyên tử phải là

$$r \approx \frac{\hbar^2 4\pi\varepsilon_0}{m_e e^2} , \qquad (153)$$

Trang 187

khoảng 53 nm. Quả thực dự đoán này thật tuyệt hảo: nó đúng là bán kính Bohr.

Câu đố 8, trang 22: Do bắt nguồn từ lượng tử tác dụng nên nguyên tử của mọi người, khổng lồ hay thấp bé đều có cùng kích thước. Điều này hàm ý rằng không có người khổng lồ như Galilei đã từng chứng minh. Các lý luận này dựa trên độ bền của vật liệu đã có; và độ bền như nhau ở mọi nơi tương đương với việc tính chất của nguyên tử ở mọi nơi đều như nhau. Việc không có người lùn bắt nguồn từ một lý do giống nhau; thiên nhiên không thể tạo ra người nhỏ hơn bình thường (dù trong bụng mẹ họ khác đáng kể với người trưởng thành) vì điều này sẽ đòi hỏi các nguyên tử nhỏ hơn.

Quyển I, trang 337

Câu đố 11, trang 27: Sự biến mất của khối lượng m trong thời gian Δt là một độ biến thiên tác dụng $c^2 m\Delta t$. Giá trị đó lớn hơn $\hbar$ rất nhiều đối với mọi vật trong đời sống thường ngày.

Câu đố 13, trang 29: Sự xuyên rào của sư tử sẽ dẫn tới một tác dụng S có độ lớn $S = 100\,\mathrm{kgm^2/s} \gg \hbar$. Hiện tượng này không thể xảy ra một cách tự phát.

Câu đố 14, trang 30: Mọi bộ nhớ, dù là của người hay của máy tính điện tử phải không được phân rã. Và sự phân rã chỉ có thể tránh được nhờ các tường cao và xác suất xuyên hầm nhỏ.

Câu đố 15, trang 30: Đúng vậy! Nhiều đức tin và huyền thoại – từ xổ số cho tới ma quỷ – đều có nguyên do là đã bỏ qua các hiệu ứng lượng tử.

Câu đố 16, trang 30: Các dòng chảy liên tục một cách hoàn hảo thì khác với sự mờ của chuyển động do lượng tử tác dụng gây ra.

Câu đố 17, trang 31: Việc không thể theo dõi hai hạt khi chúng di chuyển xảy ra khi khoảng cách giữa chúng d nhỏ hơn độ bất định vị trí do động lượng tương đối của chúng p, tức là khi $d < \hbar/p$. Hãy kiểm tra các con số trong trường hợp electron, nguyên tử, phân tử, vi khuẩn, con người và thiên hà.

Câu đố 18, trang 31: Photon cũng không thể phân biệt được. Xem Trang 64.

Câu đố 19, trang 36: Trong phần vật chất tạo nên cơ cấu hồi trong đồng hồ.

Câu đố 20, trang 37: Sự tăng trưởng không tỷ lệ với cường độ hay tần số của ánh sáng nhưng cả hai đều có *ngưỡng*. Đây là các hiệu ứng lượng tử.

Câu đố 21, trang 37: Mọi hiệu ứng đã để cập như hiệu ứng xuyên hầm, giao thoa, phân rã, biến đổi, tính không trống rỗng của chân không, tính bất định và tính ngẫu nhiên đều gặp trong lĩnh vực hạt nhân.

Câu đố 22, trang 37: Điều này tuy không hiển nhiên nhưng đúng. Thật ra không còn tuỳ chọn nào khác và khi bạn thử tìm thì bạn sẽ nhận ra điều đó.

Câu đố 23, trang 37: Tom Thumb được giả định là thông minh như một người bình thường. Nhưng bộ não thì không thể thu nhỏ lại. Hình Fractal mâu thuẫn với chiều dài Planck và định luật Moore mâu thuẫn với sự hiện hữu của nguyên tử.

Câu đố 24, trang 37: Moment động lượng toàn phần bao gồm moment động lượng quỹ đạo. Moment động lượng quỹ đạo $\boldsymbol{L}$ thì sử dụng bán kính và động lượng tức là $\boldsymbol{L} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{p}$. Moment động lượng toàn phần là một bội của $\hbar$.

Câu đố 25, trang 37: Chúng ta có thể làm như vậy!

Câu đố 26, trang 38: Đó chỉ là hệ thức bất định. Bohr mở rộng ý tưởng này cho tất cả các cặp khái niệm khác, vào lĩnh vực triết học, như 'sự rõ ràng' và 'độ chính xác' của sự diễn giải: cả hai không thể nhiều như nhau.

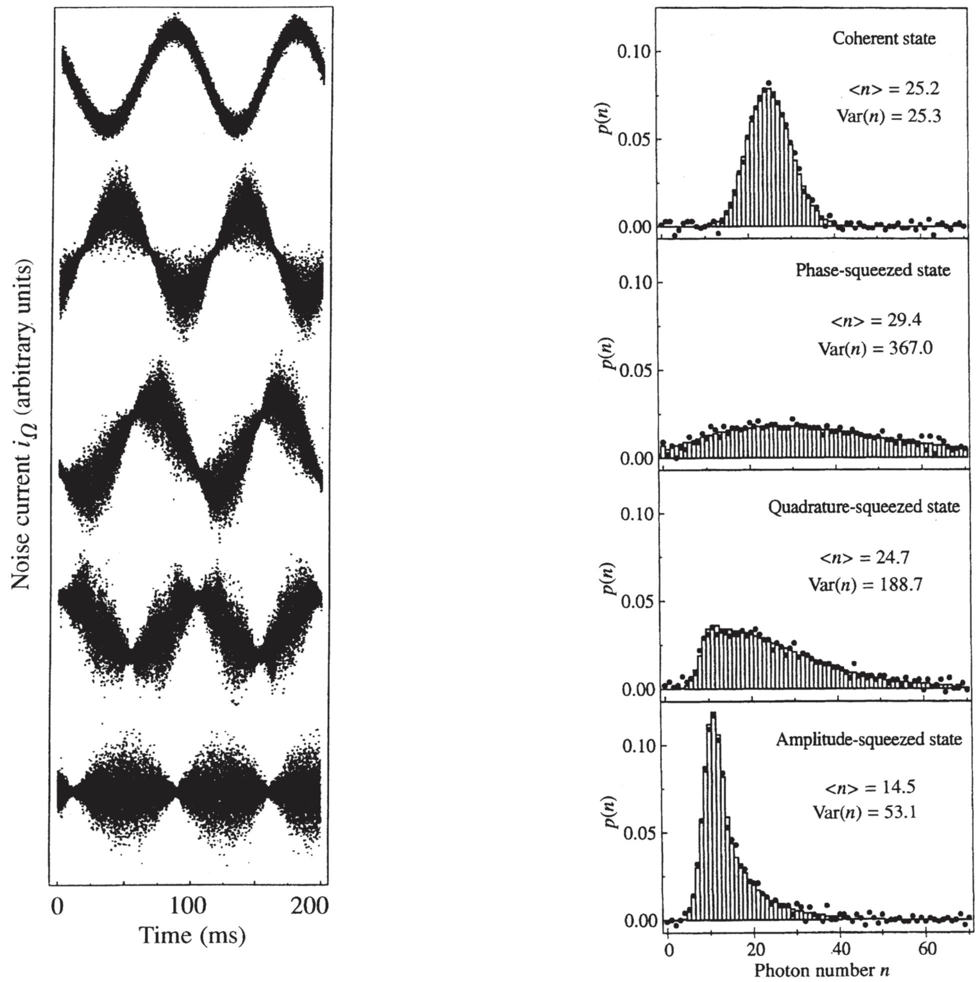
Câu đố 27, trang 39: Big bang không thể là một biến cố.

Câu đố 29, trang 46: Photon có mang điện sẽ bị lệch trong điện từ trường; đặc biệt, chúng không thể giao nhau mà không bị nhiễu loạn. Ta chưa thấy hiện tượng này. Photon có khối lượng sẽ bị vật có khối lượng, thí dụ như Mặt trời, làm lệch hướng nhiều hơn những gì ta quan sát được.

Câu đố 31, trang 46: Để đo động lượng ta cần dụng cụ đo mở rộng trong không gian; để đo vị trí ta cần dụng cụ đo định xứ trong không gian.

Câu đố 32, trang 48: Photon là hạt sơ cấp vì chúng thể hiện cho tác dụng cực tiểu, không thể phân rã, không bị biến dạng hay tách rời, không có khối lượng và điện tích, không có lượng tử số khác và vì chúng xuất hiện trong Lagrangian của Điện động lực học lượng tử.

Câu đố 33, trang 51: Điện trường đo được và sự phân bố photon được trình bày trong đồ thị nổi tiếng được in lại trong Hình 90.



HÌNH 90 Hình bên trái, từ trên xuống dưới: điện trường và sự mờ nhoè của nó đo được trong trạng thái điều hợp, trạng thái chân không bị nén, trạng thái nén phase, trạng thái nén bậc hai hỗn hợp và trạng thái nén biên độ, tất cả với một số ít photon. Hình bên phải: phân bố photon tương ứng với 4 trạng thái trên cùng. (© G. Breitenbach/Macmillan, from Xem 19)

Câu đố 35, trang 52: Việc đặt vấn đề không rõ ràng. Bức xạ nhiệt nhưng số photon phụ thuộc thể tích đang xét.

Câu đố 37, trang 57: Photon tần số vô tuyến có thể đếm được bằng cách sử dụng thí nghiệm bơm quang học trong đó các trạng thái nguyên tử bị tách ra bởi thiểu số 'bước sóng vô tuyến', nhờ từ trường. Các đồng hồ caesium cũng phát hiện các photon tần số vô tuyến bằng các phương tiện quang học. Hiệu ứng Josephons và phương pháp chụp ảnh cộng hưởng từ là các phương pháp bổ sung để phát hiện các 'photon vô tuyến'.

Câu đố 38, trang 59: Để mắt thường có thể quan sát được các vân giao thoa thì các vân này phải khả kiến trong thời gian khoảng 0.1 s. Điều này đòi hỏi sự sai khác tần số giữa hai chùm chỉ khoảng 10 Hz. Ta đạt được điều này nếu chùm ánh sáng được tách làm hai hoặc hai chùm ánh sáng phải do hai laser ổn định có độ chính xác cao.

Câu đố 39, trang 63: Mô hình mũi tên đã bao hàm điều kiện một mũi tên mô tả một hạt lượng

tử.

Câu đố 45, trang 66: Dù gặp nhiều thử thách, hứa hẹn lưu danh muôn thuở, kết luận này vẫn đứng vững.

Câu đố 50, trang 69: Lập luận này đúng. Nếu bàn luận chi tiết hơn ta sẽ thấy Điện động lực học cổ điển mâu thuẫn với *tất cả* các màu quan sát được trong thiên nhiên.

Xem 178

Câu đố 54, trang 74: Việc tính toán không dễ nhưng cũng không quá khó. Nếu hướng ban đầu *gần* với phương thẳng đứng thì thời gian rơi T bằng

$$T = \frac{1}{2\pi} T_0 \ln \frac{8}{\alpha} \tag{154}$$

trong đó α là góc ban đầu và giả sử khi rơi có đi ngang qua giá trị π. Ở đây T_0 là thời gian dao động của viết chì khi góc nhỏ. (Bạn có thể xác định nó không?) Hệ thức bất định đối với đầu viết chì cho ta góc ban đầu *cực tiểu* vì độ bất định động lượng không thể lớn tuỳ ý. Bạn có thể cho một giới hạn trên. Khi đã biết góc này, bạn có thể tính thời gian cực đại.

Câu đố 55, trang 75: Hãy sử dụng nhiệt độ để tính động năng trung bình rồi suy ra tốc độ trung bình của nguyên tử.

Câu đố 56, trang 75: Ở nhiệt độ như vậy ta không thể phân biệt các nguyên tử một cách hoàn toàn; chúng tạo ra một trạng thái vật chất với các tính chất đặc biệt gọi là *thể ngưng tụ*. Thể ngưng tụ cũng không đứng yên nhưng do khối lượng của nó lớn nên sự thăng giáng của nó giảm đi rất nhiều so với một nguyên tử đơn lẻ.

Câu đố 57, trang 79: Chỉ có các biến mà tích của chúng có cùng đơn vị với tác dụng vật lý – Js – mới có thể bổ sung cho nhau.

Câu đố 58, trang 80: Sử dụng $\Delta E < E$ và $a\ \Delta t < c$.

Câu đố 62, trang 87: Lượng tử tác dụng không chỉ áp dụng cho các phép đo mà còn áp dụng cho chính chuyển động và đặc biệt cho mọi chuyển động. Các tác dụng của lực hạt nhân, các hạt trong hạt nhân và các hạt bức xạ hạt nhân cũng phải tuân theo giới hạn này. Và các thí nghiệm chứng tỏ rằng đúng như vậy. Bạn có thể kiểm tra lại là nếu không đúng như vậy thì ta có thể tránh được lượng tử tác dụng trong trường hợp điện động lực.

Câu đố 65, trang 97: Bên ngoài nhà xe tất cả các nguyên tử cần phải tái tạo một cấu trúc rắn giống như vậy.

Câu đố 66, trang 98: Các chip Terabyte cần các ô nhớ nhỏ tức là rào phải mỏng. Rào mỏng thì xác suất xuyên hầm sẽ lớn và như vậy sẽ không có bộ nhớ.

Câu đố 69, trang 109: Nếu hạt không phải là hạt sơ cấp các thành phần của nó sẽ liên kết với nhau bằng một sự tương tác. Nhưng ta không biết tương tác nào ngoài các tương tác của mô hình chuẩn.

Câu đố 70, trang 110: Khó khăn trong việc quan sát các nguyên tử hydrogen bắt nguồn từ kích thước nhỏ của chúng và số electron ít. Kết quả là các nguyên tử hydrogen tạo ra sự tương phản rất yếu trong ảnh chụp bằng tia X. Tương tự như vậy ta cũng khó chụp ảnh của nó bằng cách sử dụng electron; bán kính Bohr của hydrogen chỉ hơi lớn hơn bước sóng Compton của electron.

Lần đầu tiên vào năm 2008, một nhóm nghiên cứu tuyên bố rằng đã chụp được ảnh của nguyên tử hydrogen bị hấp phụ trên graphene nhờ sự giúp đỡ của kính hiển vi điện tử truyền qua. Để biết thêm chi tiết, hãy xem J. C. Meyer, C. O. Grit, M. F. Crommle & A. Zetti, *Imaging and dynamics of light atoms and molecules on graphene*, Nature 454, pp. 319–322, 2008. Tuy vậy, hình như kết quả này chưa được các nhóm khác kiểm chứng.

Nhiều ảnh của hydrogen đã xuất hiện trong những năm vừa qua. Bạn có thể tìm phân tử olympicene trên internet. Bạn có thể xem về một kết quả vừa có liên quan đến việc chụp ảnh hydrogen.

Trang 186

Câu đố 71, trang 110: Việc này không dễ! Bạn có thể sử dụng khái niệm tác dụng để chứng minh rằng có một sự khác nhau cơ bản giữa các toán tử rất giống nhau và rất khác nhau không?

Câu đố 73, trang 111: $r = 86\,\text{pm}$, như vậy $T = 12\,\text{eV}$. Đây là so với giá trị thực của 13.6 eV. Thủ thuật để suy ra công thức này là sử dụng $\langle\psi\,|\,r_x^2\,|\,\psi\rangle = \frac{1}{3}\langle\psi\,|\,\boldsymbol{rr}\,|\,\psi\rangle$, một hệ thức đúng cho các trạng thái không có moment động lượng quỹ đạo. Nó đúng đối với mọi toạ độ và 3 biến động lực động lượng cũng như hệ không tương đối tính.

Câu đố 74, trang 111: Một thăng giáng lượng tử cần vũ trụ đã hiện hữu. Những phát biểu như vậy rất thường gặp trên báo chí và hoàn toàn vô nghĩa.

Câu đố 75, trang 113: Các chất điểm không thể đánh dấu được; ta không thể phân biệt các hạt lân cận do có lượng tử tác dụng.

Câu đố 76, trang 113: Câu trả lời là *hai* găng tay. Trong sự sắp xếp ban đầu nếu hai người đàn ông và hai người đàn bà muốn yêu nhau mà không gặp nguy hiểm thì về mặt lý thuyết họ chỉ cần *2* condom.

Câu đố 80, trang 116: Công thức Sackur–Tetrode được suy ra dễ nhất theo cách sau đây. Ta bắt đầu với một khí lý tưởng đơn nguyên tử có thể tích V, với N hạt và tổng năng lượng là U. Trong không gian phase, *tổng trạng thái* Z được tính theo công thức

$$Z = \frac{V^N}{N!}\frac{1}{\Lambda^{3N}}\,. \tag{155}$$

Ta sử dụng công thức gần đúng của Stirling $N! \approx N^N/e^N$ và định nghĩa entropy $S = \partial(kT\ln Z)/\partial T$. Thay vào định nghĩa của Λ ta được phương trình Sackur–Tetrode.

Câu đố 82, trang 118: Để viết điều gì đó về hai hạt lên giấy ta cần phân biệt được chúng mặc dù sự phân biệt là điều không bắt buộc.

Câu đố 84, trang 124: Ý tưởng về *tiền lượng tử*, không tương thích với yêu cầu về kích thước và thời gian sống của giấy bạc thật.

Câu đố 85, trang 125: Hai người sinh đôi còn khác nhau về các khúc cuộn của ruột, chỉ tay và các nếp gấp trên da. Đôi khi các tính chất như các chấm đen trên da của hai người là các điểm nghịch đảo gương.

Câu đố 93, trang 136: Ba.

Câu đố 94, trang 136: Không thể được. Điều này hơi khó hình dung.

Câu đố 95, trang 137: Thiên thần có thể phân biệt bằng tên, có thể nói và hát; do đó họ được tạo ra từ một số lớn fermion. Đúng ra nhiều thiên thần có kích thước cỡ con người vì vậy họ không đứng vừa trên đầu một cây kim.

Câu đố 100, trang 141: Một boson có thể được biểu diễn bằng một vật dán vào một sợi chỉ vô cùng mảnh có hai đầu ở vô cực.

Câu đố 101, trang 142: Cây cối, giống như các vật vĩ mô, có spin phụ thuộc vào moment động lượng của chúng. Vì các vật cổ điển có phase có thể quan sát được nên spin không xác định. Hỏi cây cối hay các vật vĩ mô là boson hay fermion là điều vô nghĩa vì chúng không phải là quanton.

Câu đố 104, trang 143: Ma quỷ, giống như thiên thần, có thể phân biệt bằng tên, có thể nói và bị nhìn thấy; như vậy chúng chứa các fermion. Tuy vậy, chúng có thể đi xuyên qua tường và trong suốt nên chúng không được tạo thành từ các fermion mà phải là hình ảnh tức là làm bằng boson. Đó là một điều mâu thuẫn.

Câu đố 105, trang 145: Sự chồng chập vĩ mô không thể vẽ ra được vì quan sát tức là tương tác với một nguồn nhiệt động lực, sẽ phá huỷ sự chồng chập.

Câu đố 107, trang 147: Sự biến mất của các phần tử ngoài đường chéo sẽ dẫn tới việc các phần tử trên đường chéo tăng lên tức là entropy tăng.

Câu đố 109, trang 154: Tốc độ năng lượng được suy ra từ sự chuyển động của hai đầu bên ngoài; tốc độ đó không bao giờ lớn hơn tốc độ ánh sáng.

Câu đố 110, trang 156: Không, vì chụp hình tức là tương tác với một nguồn nhiệt động lực sẽ phá huỷ sự chồng chập. Nói rõ hơn, một tấm ảnh đòi hỏi sự chiếu sáng; chiếu sáng là một trường điện từ vĩ mô; một trường vĩ mô là một nguồn nhiệt động lực; nguồn nhiệt động lực dẫn tới sự mất điều hợp và do đó phá huỷ sự chồng chập.

Câu đố 112, trang 158: Điều này còn tuỳ. Chúng có thể do giao thoa hay do tổng cường độ. Trong trường hợp sóng vô tuyến thì hiệu ứng rõ hơn. Nếu ở một tần số đặc biệt nào đó tín hiệu thay đổi tuần hoàn từ trạm này qua trạm kia, ta có một hiệu ứng giao thoa thực sự.

Câu đố 113, trang 158: Chúng giao thoa với nhau. Nhưng đây là một câu hỏi mẹo; electron đơn sắc là gì? Nó có xảy ra trong phòng thí nghiệm không?

Câu đố 114, trang 158: Một máy tính như vậy đòi hỏi các thành phần có liên hệ rõ ràng về phase; các mối liên hệ về phase như vậy cực nhạy với các nhiễu loạn bên ngoài. Hiện nay, mối liên hệ không dài hơn 1 microsecond, trong khi những chương trình máy tính cần vài phút hay vài giờ để chạy.

Câu đố 115, trang 158: Một mẫu tin là tác dụng của một quá trình *khó đảo ngược hay hoàn tác*. Vết của trứng bể trên một đĩa thuỷ tinh lớn dễ lau sạch hơn khi nó ở trong đám lông của một con cừu. Răng bị gãy, quần áo bị rách hay vết trầy trên một bề mặt rộng là các mẫu tin tốt. Các nhà pháp y sẽ biết nhiều thí dụ bổ sung cho phần này.

Câu đố 118, trang 166: Bất kỳ một nguồn nhiệt động lực nào cũng có thể là lý do thí dụ như khí quyển, sóng âm, điện từ trường, v.v...

Câu đố 119, trang 167: Mặt trăng tiếp xúc với các nguồn nhiệt động lực như gió Mặt trời, vẫn thạch, bức xạ nền vũ trụ, dòng neutrino từ Mặt trời, tia vũ trụ, v.v...

Câu đố 120, trang 169: Các thế tuần hoàn trong không gian có tính chất này. Sự mất điều hợp dẫn tới sự chéo hoá động lượng.

Câu đố 121, trang 172: Nếu có, bạn hãy cho tác giả biết.

Câu đố 122, trang 183: Độ dịch chuyển đỏ là $z = 9.9995$. Từ công thức dịch chuyển Doppler dọc ta có $v/c = ((z+1)^2 - 1)/((z+1)^2 + 1)$; trong trường hợp này thì kết quả là 0.984. Thiên hà chuyển động ra xa Trái đất với tốc độ bằng 98.4 % tốc độ ánh sáng.

Câu đố 127, trang 185: Các nguyên tử hydrogen trong các trạng thái riêng vì các lý do đã giải thích trong chương về sự chồng chập và xác suất: trong một chất khí, các nguyên tử là một phần của một nguồn nhiệt động lực và như vậy gần như luôn luôn ở trong các trạng thái năng lượng riêng.

Câu đố 131, trang 196: Nếu nhiều chùm ánh sáng được tập trung vào khoảng không gian giữa các gương và tần số ánh sáng được điều hưởng đúng với tần số hấp thu của các nguyên tử thì các nguyên tử sẽ chịu tác dụng của một lực hồi phục khi chúng đi ra khỏi vùng ánh sáng hội tụ. Bằng cách chiếu 6 chùm ánh sáng vào vùng đó từ 6 hướng khác nhau, ta sẽ bẫy được các nguyên tử. Kỹ thuật làm lạnh bằng laser hiện nay đã được sử dụng rộng rãi trong các phòng thí nghiệm.

Câu đố 132, trang 196: Không, mặc dù có tên như vậy, phosphor không phải là chất lân quang mà là chất hoá phát quang.

Câu đố 134, trang 198: Đây là một câu hỏi mẹo. Một sự thay đổi α đòi hỏi có sự thay đổi của c, $\hbar$, e hay ε_0. Ta không thấy sự thay đổi nào xảy ra vì mọi dụng cụ đo của chúng ta đều dựa trên các đơn vị này. Sự nghiên cứu về sự thay đổi của α, dù xuất hiện nhiều trên báo chí và tạp chí khoa học đều là những câu chuyện vu vơ.

Câu đố 135, trang 198: Một sự thay đổi của các đơn vị vật lý kiểu như $\hbar = c = e = 1$ sẽ làm thay đổi giá trị của ε_0 dẫn đến $4\pi\varepsilon_o = 1/\alpha \approx 137.036$.

Câu đố 138, trang 208: Khối lượng là số đo năng lượng. 'Bình phương khối lượng' không có ý nghĩa gì.

Câu đố 141, trang 211: Các giới hạn Planck có thể bị vượt qua đối với các biến động lực quảng tính - là các biến mà đối với nó, hệ nhiều hạt có thể vượt qua các giới hạn của hệ một hạt, thí dụ như khối lượng, động lượng, năng lượng hay điện trở.

Câu đố 143, trang 213: Đừng quên sự giãn thời gian tương đối tính.

Câu đố 144, trang 213: Công thức với $n-1$ là vừa vặn nhất. Tại sao?

Câu đố 147, trang 214: Không! Chính xác quá thành ra vô nghĩa. Chúng chỉ mang tính minh hoạ cho dáng điệu của phân bố Gauss. Các phân bố số đo thực không phải là phân bố Gauss theo độ chính xác hàm chứa trong các con số này.

Câu đố 148, trang 215: Khoảng 0.33 m/s. Nó *không phải là* 0.333 m/s và cũng *không có* chuỗi số 3 nào dài hơn nữa!

Câu đố 150, trang 221: Tốc độ chậm lại có *bậc hai* theo thời gian vì mỗi lần chậm mới cộng thêm vào lần cũ!

Câu đố 151, trang 221: Không, chỉ có các tính chất của một số phần trong vũ trụ được liệt kê. Tự vũ trụ không có tính chất, như ta sẽ trình bày chi tiết trong phần cuối của cuộc thám hiểm này.

Quyển VI, trang 112

Câu đố 152, trang 223: Gấp đôi của số đó, số gồm một dãy các số chẵn, v.v...

Câu đố 155, trang 226: Ta sẽ thấy trong quyển cuối cùng là mọi số đo đều có cận trên và cận dưới. Ta cũng sẽ thấy rằng hai kết quả đo vật lý không thể khác nhau kể từ số thập phân thứ 300 trở đi. Vì thật ra mọi kết quả đo đều là số thực nhưng điều ngược lại không đúng. Ta cần nhấn mạnh rằng đối với Thuyết lượng tử, Thuyết tương đối và vật lý Galilei điều ràng buộc này nói chung không có hệ quả nào khác.

Câu đố 157, trang 227: $|z|^2$ là *định thức* của matrix $z = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix}$.

Câu đố 162, trang 228: Sử dụng lý luận đường chéo của Cantor như trong câu đố 256.

Câu đố 163, trang 229: Một quaternion $X = ai + bj + ck$ với $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ là lời giải của phương trình $X^2 + 1 = 0$; lời giải thuần ảo $+i$ và $-i$ được tăng thêm một hình cầu các lời giải liên tục trong không gian quaternion.

Câu đố 166, trang 231: Phép quay một góc 2π được mô tả bằng -1. Chỉ có phép quay 4π được mô tả bằng $+1$; đúng là quaternion mô tả các spinor.

Câu đố 167, trang 233: Chỉ cần kiểm tra từng thành phần của kết quả. Cũng nên xem phần tham khảo đã đề cập.

Câu đố 168, trang 235: Không. Vì octonion đơn vị không có tính kết hợp nên chúng không tạo thành một nhóm. Dù bề ngoài có vẻ hấp dẫn, cách lập luận này không giúp ta hiểu rõ bản chất của các tương tác cơ bản.

Câu đố 169, trang 235: Vì số nguyên Gaussian $n + im$ là số nguyên tố nên số nguyên $n^2 + m^2$ phải là số nguyên tố, và thêm nữa, một điều kiện về n mod 3 phải được thoả mãn; điều kiện nào và tại sao?

Câu đố 171, trang 236: Tập hợp chỉ chứa vector zero.

Câu đố 172, trang 237: Metric thì chính quy, xác định dương và tuân theo bất đẳng thức tam giác.

Câu đố 174, trang 238: Chủ yếu chỉ là các không gian vector liệt kê trong phụ lục (hay trong sách).

Câu đố 175, trang 238: Nếu bạn không làm được, hãy đổ lỗi cho giáo viên toán của bạn ở trường trung học, rồi hãy tìm các định nghĩa. Đó không phải là một chủ đề khó.

Câu đố 176, trang 238: Các không gian có thể hiện hữu một cách gần đúng, là trung bình của các cấu trúc không liên tục. Ý tưởng này được tìm hiểu trong các nghiên cứu hiện đại; một thí dụ đã được nêu ra trong quyển cuối cùng của bộ sách này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

> Chỉ có người điên mới không viết vì tiền.
>
> Samuel Johnson

> Ngay khi bạn viết, không có thời gian để đọc phần còn lại.
>
> Vô danh

1 GIUSEPPE FUMAGALLI, *Chi l'ha detto?*, Hoepli, Milano, 1983. Cited on page 15.

2 The quantum of action was introduced in MAX PLANCK, *Über irreversible Strahlungsvorgänge*, Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften, Berlin pp. 440–480, 1899. In the paper, Planck used the letter *b* for what nowadays is called *h*. Cited on page 17.

3 Bohr explained the indivisibilty of the quantum of action in his famous Como lecture. See N. BOHR, *Atomtheorie und Naturbeschreibung*, Springer, 1931. On page 16 he writes: 'No more is it likely that the fundamental concepts of the classical theories will ever become superfluous for the description of physical experience. The recognition of the indivisibility of the quantum of action, and the determination of its magnitude, not only depend on an analysis of measurements based on classical concepts, but it continues to be the application of these concepts alone that makes it possible to relate the symbolism of the quantum theory to the data of experience.' He also writes: '...the fundamental postulate of the indivisibility of the quantum of action is itself, from the classical point of view, an irrational element which inevitably requires us to forgo a causal mode of description and which, because of the coupling between phenomena and their observation, forces us to adopt a new mode of description designated as complementary in the sense that any given application of classical concepts precludes the simultaneous use of other classical concepts which in a different connection are equally necessary for the elucidation of the phenomena ...' and '...the finite magnitude of the quantum of action prevents altogether a sharp distinction being made between a phenomenon and the agency by which it is observed, a distinction which underlies the customary concept of observation and, therefore, forms the basis of the classical ideas of motion.' Other statements about the indivisibility of the quantum of action can be found in N. BOHR, *Atomic Physics and Human Knowledge*, Science Editions, 1961. See also MAX JAMMER, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley, first edition, 1974, pp. 90–91. Cited on page 17.

4 For some of the rare modern publications emphasizing the quantum of action see M. B. MENSKY, *The action uncertainty principle and quantum gravity*, Physics Letters A **162**, p. 219, 1992, and M. B. MENSKY, *The action uncertainty principle in continuous quantum measurements*, Physics Letters A **155**, pp. 229–235, 1991. Schwinger's quantum-action principle is also used in RICHARD F. W. BADER, *Atoms in Molecules – A Quantum Theory*, Oxford University Press, 1994.

There is a large number of general textbooks on quantum theory. There is one for every taste.

A well-known *conceptual* introduction is JEAN-MARC LÉVY-LEBLOND & FRANÇOISE BALIBAR, *Quantique – Rudiments*, Masson, 1997, translated into English as *Quantics*, North-Holland, 1990.

One of the most beautiful books is JULIAN SCHWINGER, *Quantum Mechanics – Symbolism of Atomic Measurements*, edited by Berthold-Georg Englert, Springer Verlag, 2001.

A modern approach with a beautiful introduction is MAX SCHUBERT & GERHARD WEBER, *Quantentheorie – Grundlagen und Anwendungen*, Spektrum Akademischer Verlag, 1993.

A standard beginner's text is C. COHEN-TANNOUDJI, B. DIU & F. LALOË, *Mécanique quantique I et II*, Hermann, Paris, 1977. It is also available in several translations.

A good text is ASHER PERES, *Quantum Theory – Concepts and Methods*, Kluwer, 1995.

For a lively approach, see VINCENT ICKE, *The Force of Symmetry*, Cambridge University Press, 1994.

New textbooks are published regularly around the world. Cited on pages 17 and 256.

5 The best source for the story about the walk in the forest with Planck's son Erwin is HANS ROOS & ARMIN HERMANN, editors, *Max Planck – Vorträge, Reden, Erinnerungen*, Springer, 2001, page 125. As the text explains, the story was told by Erwin Planck to at least two different people. Erwin Planck himself was part of the failed 1944 plot against Hitler and was hanged in January 1945. Cited on page 20.

6 MAX BORN, *Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge (vorläufige Mitteilung)*, Zeitschrift für Physik **37**, pp. 863–867, 1926, MAX BORN, *Quantenmechanik der Stoßvorgänge*, Zeitschrift für Physik **38**, pp. 803–827, 1926. Cited on page 24.

7 See for example the papers by JAN HILGEVOORD, *The uncertainty principle for energy and time*, American Journal of Physics **64**, pp. 1451–1456, 1996, and by PAUL BUSCH, *On the time–energy uncertainty reaction, parts 1 & 2*, Foundations of Physics **20**, pp. 1–43, 1990. A classic is the paper by EUGENE P. WIGNER, *On the time–energy uncertainty relation*, in ABDUS SALAM & EUGENE P. WIGNER, editors, *Aspects of Quantum Theory*, Cambridge University Press, 1972. Cited on page 26.

8 See also the booklet by CLAUS MATTHECK, *Warum alles kaputt geht – Form und Versagen in Natur und Technik*, Forschungszentrum Karlsruhe, 2003. Cited on page 30.

9 R. CLIFTON, J. BUB & H. HALVORSON, *Characterizing quantum theory in terms of information-theoretic constraints*, arxiv.org/abs/quant-ph/0211089. Cited on page 36.

10 This way to look at cans of beans goes back to the text by SUSAN HEWITT & EDWARD SUBITZKY, *A call for more scientific truth in product warning labels*, Journal of Irreproducible Results **36**, nr. 1, 1991. Cited on page 38.

11 J. MALIK, *The yields of the Hiroshima and Nagasaki nuclear explosions*, Technical Report LA-8819, Los Alamos National Laboratory, September 1985. Cited on page 38.

12 The quotes on motion are found in chapter VI of F. ENGELS, *Herrn Eugen Dührings Umwälzung der Wissenschaft*, Verlag für fremdsprachliche Literatur, 1946. The book is commonly called *Anti-Dühring*. Cited on pages 40 and 75.

13 RODNEY LOUDON, *The Quantum Theory of Light*, Oxford University Press, 2000. Cited on page 41.

14 E. M. BRUMBERG & S. I. VAVILOV, Izvest. Akad. Nauk. Omen Ser. 7, p. 919, 1933. Cited on page 41.

15 On photon detection in the human eye, see the influential review by F. Rieke & D. A. Baylor, *Single-photon detection by rod cells of the retina*, Reviews of Modern Physics **70**, pp. 1027–1036, 1998. It can be found on the internet as a pdf file. Cited on page 43.

16 F. Rieke & D. A. Baylor, *Single-photon detection by rod cells of the retina*, Reviews of Modern Physics **70**, pp. 1027–1036, 1998. They also mention that the eye usually works at photon fluxes between 10^8 /μm^{2}s (sunlight) and 10^{-2} /μm^{2}s (starlight). The cones, in the retina detect, in colour, light intensities in the uppermost seven or eight decades, whereas the rods detect, in black and white, the lower light intensities. Cited on pages 45 and 46.

17 E. Fischbach, H. Kloor, R. A. Langel, A. T. Y. Lui & M. Peredo, *New geomagnetic limit on the photon mass and on long-range forces coexisting with electromagnetism*, Physical Review Letters **73**, pp. 514–517, 1994. Cited on page 46.

18 A. H. Compton, *The scattering of X-rays as particles*, American Journal of Physics **29**, pp. 817–820, 1961. This is a pedagogical presentation of the discoveries he made in 1923. Cited on page 46.

19 The reference paper on this topic is G. Breitenbach, S. Schiller & J. Mlynek, *Measurement of the quantum states of squeezed light*, **387**, pp. 471–475, 1997. It is available freely at gerdbreitenbach.de/publications/nature1997.pdf. Cited on pages 49 and 242.

20 The famous paper is R. Hanbury Brown & R. Q. Twiss, Nature **178**, p. 1046, 1956. They got the idea to measure light in this way from their earlier work, which used the same method with radio waves: R. Hanbury Brown & R. Q. Twiss, Nature **177**, p. 27, 1956. The complete discussion is given in their papers R. Hanbury Brown & R. Q. Twiss, *Interferometry of the intensity fluctuations in light. I. Basic theory: the correlation between photons in coherent beams of radiation*, Proceedings of the Royal Society A **242**, pp. 300–324, 1957, and R. Hanbury Brown & R. Q. Twiss, *Interferometry of the intensity fluctuations in light. II. An experimental test of the theory for partially coherent light*, Proceedings of the Royal Society A **243**, pp. 291–319, 1958. Both are dowloadable for free on the internet and are well worth reading. Cited on page 53.

21 J. Glanz, *First light from a space laser*, Science **269**, p. 1336, 1995. Cited on page 55.

22 A. Einstein, *Über einen die Erzeugung und Umwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Standpunkt*, Annalen der Physik **17**, pp. 132–184, 1905. Cited on page 56.

23 See the summary by P. W. Milonni, *Answer to question 45: What (if anything) does the photoelectric effect teach us?*, American Journal of Physics **65**, pp. 11–12, 1997. Cited on page 56.

24 For a detailed account, See J. J. Prentis, *Poincaré's proof of the quantum discontinuity of nature*, American Journal of Physics **63**, pp. 339–350, 1995. The original papers are Henri Poincaré, *Sur la théorie des quanta*, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris) **153**, pp. 1103–1108, 1911, and Henri Poincaré, *Sur la théorie des quanta*, Journal de Physique (Paris) **2**, pp. 5–34, 1912. Cited on page 56.

25 J. Jacobson, G. Björk, I. Chang & Y. Yamamoto, *Photonic de Broglie waves*, Physical Review Letters **74**, pp. 4835–4838, 1995. The first measurement was published by E. J. S. Fonseca, C. H. Monken & S. de Pádua, *Measurement of the de Broglie wavelength of a multiphoton wave packet*, Physical Review Letters **82**, pp. 2868–2671, 1995. Cited on page 56.

26 For the three-photon state, see M. W. Mitchell, J. S. Lundeen & A. M. Steinberg, *Super-resolving phase measurements with a multiphoton entangled state*, Nature **429**, pp. 161–164, 2004, and for the four-photon state see, in the same edition, P. Walther, J. -W. Pan,

M. Aspelmeyer, R. Ursin, S. Gasparoni & A. Zeilinger, *De Broglie wavelength of a non-local four-photon state*, Nature **429**, pp. 158–161, 2004. Cited on page 57.

27 For an introduction to squeezed light, see L. Mandel, *Non-classical states of the electromagnetic field*, Physica Scripta T **12**, pp. 34–42, 1986. Cited on page 57.

28 Friedrich Herneck, *Einstein und sein Weltbild: Aufsätze und Vorträge*, Buchverlag Der Morgen, 1976, page 97. Cited on page 58.

29 The famous quote on single-photon interference is found on page 9 of famous, beautiful but difficult textbook P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, Clarendon Press, 1930. It is also discussed, in a somewhat confused way, in the otherwise informative article by H. Paul, *Interference between independent photons*, Reviews of Modern Physics **58**, pp. 209–231, 1986. Cited on pages 61 and 67.

30 The original papers on coherent states are three: R. J. Glauber, *The quantum theory of optical coherence*, Physical Review **130**, pp. 2529–2539, 1963, J. R. Klauder, *Continuous-representation theory*, I and II, Journal of Mathematical Physics **4**, pp. 1055–1058, 1963, and E. C. G. Sudarshan, *Equivalence of semiclassical and quantum mechanical descriptions of statistical light beams*, Physical Review Letters **10**, p. 227, 1963. Cited on page 64.

31 See, for example the wonderful text Richard P. Feynman, *QED – The Strange Theory of Light and Matter*, pp. 73–75, Princeton University Press, 1988, or Richard P. Feynman & Steven Weinberg, *Elementary Particles and the Laws of Physics*, p. 23, Cambridge University Press 1987. Cited on page 65.

32 Wolfgang Tittel, J. Brendel, H. Zbinden & N. Gisin, *Violation of Bell inequalities by photons more than 10 km apart*, Physical Review Letters **81**, pp. 3563–3566, 26 October 1998. Cited on page 65.

33 N. Bohr & L. Rosenfeld, *Zur Frage der Meßbarkeit der elektromagnetischen Feldgrößen*, Mat.-fys. Medd. Danske Vid. Selsk. **12**, p. 8, 1933. The results were later published in English as N. Bohr & L. Rosenfeld, *Field and charge measurements in quantum electrodynamics*, Physical Review **78**, pp. 794–798, 1950. Cited on page 66.

34 Misleading statements are given in the introduction and in the conclusion of the review by H. Paul, *Interference between independent photons*, Review of Modern Physics **58**, pp. 209–231, 1986. However, in the bulk of the article the author in practice retracts the statement, e.g. on page 221. Cited on page 67.

35 G. Magyar & L. Mandel, *Interference fringes produced by superposition of two independent maser light beams*, Nature **198**, pp. 255–256, 1963. Cited on page 67.

36 R. Kidd, J. Aedini & A. Anton, *Evolution of the modern photon*, American Journal of Physics **57**, pp. 27–35, 1989, Cited on page 70.

37 The whole bunch of atoms behaves as one single molecule; one speaks of a Bose–Einstein condensate. The first observations, worthy of a Nobel prize, were by M.H. Anderson & al., *Observation of Bose–Einstein condensation in a dilute atomic vapour*, Science **269**, pp. 198–201, 1995, C. C. Bradley, C. A. Sackett, J. J. Tollett & R. G. Hulet, *Evidence of Bose–Einstein condensation in an atomic gas with attractive interactions*, Physical Review Letters **75**, pp. 1687–1690, 1995, K. B. Davis, M. -O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn & W. Ketterle, *Bose–Einstein condensation in a gas of sodium atoms*, Physical Review Letters **75**, pp. 3969–3973, 1995. For a simple introduction, see W. Ketterle, *Experimental studies of Bose–Einstein condensation*, Physics Today pp. 30–35, December 1999. Cited on page 75.

38 J. L. Costa-Krämer, N. Garcia, P. García-Mochales & P. A. Serena, *Nanowire formation in macroscopic metallic contacts: a universal property of metals*, Surface

Science Letters **342**, pp. L1144–L1152, 1995. See also J. L. Costa-Krämer, N. Garcia, P. A. Serena, P. García-Mochales, M. Marqués & A. Correia, *Conductance quantization in nanowires formed in macroscopic contacts*, Physical Review B p. 4416, 1997. Cited on page 76.

39 The beautiful undergraduate experiments made possible by this discovery are desribed in E. L. Foley, D. Candela, K. M. Martini & M. T. Tuominen, *An undergraduate laboratory experiment on quantized conductance in nanocontacts*, American Journal of Physics **67**, pp. 389–393, 1999. Cited on page 76.

40 L. de Broglie, *Ondes et quanta*, Comptes rendus de l'Académie des Sciences **177**, pp. 507–510, 1923. Cited on page 77.

41 C. Jönsson, *Interferenz von Elektronen am Doppelspalt*, Zeitschrift für Physik **161**, pp. 454–474, 1961, C. Jönsson, *Electron diffraction at multiple slits*, American Journal of Physics **42**, pp. 4–11, 1974. Because of the charge of electons, this experiment is not easy to perform: any parts of the set-up that are insulating get charged and distort the picture. That is why the experient was performed much later with electrons than with atoms, neutrons and molecules. Cited on page 78.

42 M. Arndt, O. Nairz, J. Vos-Andreae, C. Keller, G. van der Zouw & A. Zeilinger, *Wave–particle duality of C60 molecules*, Nature **401**, pp. 680–682, 14 October 1999. See also the observation for tetraphenyleprophyrin and $C_{60}F_{48}$ by the same team, published as L. Hackermüller & al., *Wave nature of biomolecules and fluorofullerenes*, Physical Review Letters **91**, p. 090408, 2003.

No phenomoenon of quantum theory has been experimentally studied as much as quantum interference. The transition from interference to non-interference has also been explored, as in P. Facchi, A. Mariano & S. Pascazio, *Mesoscopic interference*, Recent Developments in Physics **3**, pp. 1–29, 2002. Cited on page 79.

43 G. Papini, *Shadows of a maximal acceleration*, arxiv.org/abs/gr-qc/0211011. Cited on page 80.

44 J. Perrin, *Nobel Prize speech*, found at www.nobel.se, and H. Nagaoka, *Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity*, Philosophical Magazine S6, 7, pp. 445–455, March 1904. Cited on page 80.

45 N. Bohr, *On the constitution of atoms and molecules: Introduction and Part I – binding of electrons by positive nuclei*, Philosophical Magazine **26**, pp. 1–25, 1913, *On the constitution of atoms and molecules: Part II – systems containing only a single nucleus*, ibid., pp. 476–502, *On the constitution of atoms and molecules: Part III*, ibid., pp. 857–875. Cited on page 80.

46 Robert H. Dicke & James P. Wittke, *Introduction to Quantum Theory*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1960. See also Stephen Gasiorowicz, *Quantum Physics*, John Wiley & Sons, 1974. Cited on page 82.

47 P. Carruthers & M. M. Nieto, *Phase and angle variables in quantum mechanics*, Review of Modern Physics **40**, pp. 411–440, 1968. Cited on page 83.

48 The indeterminacy relation for rotational motion is well explained by W. H. Louisell, *Amplitude and phase uncertainty relations*, Physics Letters **7**, p. 60, 1963. Cited on page 83.

49 S. Franke-Arnold, S. M. Barnett, E. Yao, J. Leach, J. Courtial & M. Padgett, *Uncertainty principle for angular position and angular momentum*, New Journal of Physics **6**, p. 103, 2004. This is a freely accessible online journal. Cited on page 83.

50 W. Gerlach & O. Stern, *Der experimentelle Nachweis des magnetischen Moments des Silberatoms*, Zeitschrift für Physik **8**, p. 110, 1921. See also the pedagogical explanation by

M. Hannout, S. Hoyt, A. Kryowonos & A. Widom, *Quantum measurement and the Stern–Gerlach experiment*, American Journal of Physics **66**, pp. 377–379, 1995. Cited on page 84.

51 J.P. Woerdman, G. Nienhuis, I. Kuščer, *Is it possible to rotate an atom?*, Optics Communications **93**, pp. 135–144, 1992. We are talking about atoms rotating around their centre of mass; atoms can of course rotate around other bodies, as discussed by M.P. Silverman, *Circular birefringence of an atom in uniform rotation: the classical perspective*, American Journal of Physics **58**, pp. 310–317, 1990. Cited on page 86.

52 J. Schmiedmayer, M.S. Chapman, C.R. Ekstrom, T.D. Hammond, S. Wehinger & D.E. Pritchard, *Index of refraction of various gases for sodium matter waves*, Physical Review Letters **74**, p. 1043-1046, 1995. Cited on page 86.

53 The original result is due to V. de Sabbata & C. Sivaram, *A minimal time and time-temperature uncertainty principle*, Foundations of Physics Letters **5**, pp. 183–189, 1992. Experimental details are found, for example, in G.T. Gillies & S.W. Allison, *Experimental test of a time-temperature formulation of the uncertainty principle via nanoparticle fluorescence*, Foundations of Physics Letters **18**, pp. 65–74, 2005. Cited on page 87.

54 Albert Einstein & Max Born, *Briefwechsel 1916 bis 1955*, Rowohlt, 1969, as cited on page 34. Cited on page 88.

55 E. Schrödinger, *Quantisierung als Eigenwertproblem I*, Annalen der Physik **79**, pp. 361–376, 1926, and *Quantisierung als Eigenwertproblem II*, Annalen der Physik **79**, pp. 489–527, 1926. Cited on page 93.

56 C.G. Gray, G. Karl & V.A. Novikov, *From Maupertius to Schrödinger. Quantization of classical variational principles*, American Journal of Physics **67**, pp. 959–961, 1999. Cited on page 93.

57 Y. Aharonov & D. Bohm, *Significance of electromagnetic potentials in the quantum theory*, Physical Review **115**, pp. 485–491, 1959. Cited on page 99.

58 R. Colella, A.W. Overhauser & S.A. Werner, *Observation of gravitationally induced quantum interference*, Physical review Letters **34**, pp. 1472–1474, 1975. Cited on page 101.

59 The trend-setting result that started this exploration was Hans-Werner Fink & al., *Atomic resolution in lens-less low-energy electron holography*, Physical Review Letters **67**, pp. 1543–1546, 1991. Cited on page 101.

60 L. Cser, Gy. Török, G. Krexner, I. Sharkov & B. Faragó, *Holographic imaging of atoms using thermal neutrons*, Physical Review Letters **89**, p. 175504, 2002. Cited on page 102.

61 G.E. Uhlenbeck & S. Goudsmit, *Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons*, Naturwissenschaften **13**, pp. 953–954, 1925. Cited on page 105.

62 L. Thomas, *The motion of the spinning electron*, Nature **117**, p. 514, 1926. Cited on page 105.

63 K. von Meyenn & E. Schucking, *Wolfgang Pauli*, Physics Today pp. 43–48, February 2001. Cited on page 106.

64 T.D. Newton & E.P. Wigner, *Localized states for elementary systems*, Review of Modern Physics **21**, pp. 400–406, 1949. L.L. Foldy & S.A. Wouthuysen, *On the Dirac theory of spin 1/2 particles and its nonrelativistic limit*, Physical Review **78**, pp. 29–36, 1950. Both are classic papers. Cited on page 106.

65 J. P. Costella & B. H. J. McKellar, *The Foldy–Wouthuysen transformation*, American Journal of Physics **63**, pp. 1119–1121, 1995. Cited on page 107.

66 For an account of the first measuremnt of the g-factor of the electron, see H. R. Crane, *How we happended to measure g-2: a tale of serendipity*, Physics in Perspective **2**, pp. 135–140, 2000. The most interesting part is how the experimentalists had to overcome the conviction of almost all theorists that the measurement was impossible in principle. Cited on page 107.

67 The g-factors for composite nuclei are explained briefly on en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_magnetic_moment and measured values are found at www-nds.iaea.org. See also H. Dehmelt, *Is the electron a composite particle?*, Hyperfine Interactions **81**, pp. 1–3, 1993. Cited on pages 108 and 255.

68 The nearest anyone has come to an image of a hydrogen atom is found in A. Yazdani, *Watching an atom tunnel*, Nature **409**, pp. 471–472, 2001. The experiments on Bose–Einstein condensates are also candidates for images of hydrogen atoms. The company Hitachi made a fool of itself in 1992 by claiming in a press release that its newest electron microscope could image hydrogen atoms. Cited on page 109.

69 A. M. Wolsky, *Kinetic energy, size, and the uncertainty principle*, American Journal of Physics **42**, pp. 760–763, 1974. Cited on page 111.

70 For a fascinating summary, see M. A. Cirone, G. Metikas & W. P. Schleich, *Unusual bound or localized states*, preprint at arxiv.org/abs/quant-ph/0102065. Cited on page 111.

71 See the paper by Martin Gardner, *Science fiction puzzle tales*, Clarkson Potter, **67**, pp. 104–105, 1981, or his book *Aha! Insight*, Scientific American & W.H. Freeman, 1978. Several versions are given A. Hajnal & P. Lovász, *An algorithm to prevent the propagation of certain diseases at minimum cost*, in *Interfaces Between Computer Science and Operations Research*, edited by J. K. Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan & P. van Emde Boas, Mathematisch Centrum, Amsterdam 1978, whereas the computer euphemism is used by A. Orlitzky & L. Shepp, *On curbing virus propagation*, Technical memorandum, Bell Labs 1989. Cited on page 113.

72 A complete discussion of the problem can be found in chapter 10 of Ilan Vardi, *Computational Recreations in Mathematica*, Addison Wesley, 1991. Cited on page 113.

73 On Gibbs' paradox, see your favourite text on thermodynamics or statistical mechanics. See also W. H. Zurek, *Algorithmic randomness and physical entropy*, Physical Review A **40**, pp. 4731–4751, 1989. Zurek shows that the Sackur–Tetrode formula can be derived from algorithmic entropy considerations. Cited on page 115.

74 S. N. Bose, *Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese*, Zeitschrift für Physik **26**, pp. 178–181, 1924. The theory was then expanded in A. Einstein, *Quantentheorie des einatomigen idealen Gases*, Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **22**, pp. 261–267, 1924, A. Einstein, *Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. Zweite Abhandlung*, Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **23**, pp. 3–14, 1925, A. Einstein, *Zur Quantentheorie des idealen Gases*, Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **23**, pp. 18–25, 1925. Cited on page 119.

75 C. K. Hong, Z. Y. Ou & L. Mandel, *Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference*, Physical Review Letters **59**, pp. 2044–2046, 1987. See also T. B. Pittman, D. V. Strekalov, A. Migdall, M. H. Rubin, A. V. Sergienko & Y. H. Shih, *Can two-photon interference be considered the interference of two photons?*, Physical Review Letters 77, pp. 1917–1920, 1996. Cited on page 120.

76 An example of such an experiment performed with electrons instead of photons is described in E. Bocquillon, V. Freulon, J.-M. Berroir, P. Degiovanni, B. Plaçais, A. Cavanna, Y. Jin & G. Fève, *Coherence and indistinguishability of single electrons emitted by independent sources*, Science **339**, pp. 1054–1057, 2013. See also the comment C. Schönenberger, *Two indistinguishable electrons interfere in an electronic device*, Science **339**, pp. 1041–1042, 2013. Cited on page 120.

77 M. Schellekens, R. Hoppeler, A. Perrin, J. Viana Gomes, D. Boiron, C.I. Westbrook & A. Aspect, *Hanbury Brown Twiss effect for ultracold quantum gases*, Science **310**, p. 648, 2005, preprint at arxiv.org/abs/cond-mat/0508466. J. Viana Gomes, A. Perrin, M. Schellekens, D. Boiron, C.I. Westbrook & M. Belsley, *Theory for a Hanbury Brown Twiss experiment with a ballistically expanding cloud of cold atoms*, Physical Review A **74**, p. 053607, 2006, preprint at arxiv.org/abs/quant-ph/0606147. T. Jeltes, J.M. McNamara, W. Hogervorst, W. Vassen, V. Krachmalnicoff, M. Schellekens, A. Perrin, H. Chang, D. Boiron, A. Aspect & C.I. Westbrook, *Comparison of the Hanbury Brown-Twiss effect for bosons and fermions*, Nature **445**, p. 402, 2007, preprint at arxiv.org/abs/cond-mat/0612278. Cited on page 120.

78 The experiment is described in E. Ramberg & G. A. Snow, *Experimental limit on a small violation of the Pauli principle*, Physics Letters B **238**, pp. 438–441, 1990. Other experimental tests are reviewed in O. W. Greenberg, *Particles with small violations of Fermi or Bose statistics*, Physical Review D **43**, pp. 4111–4120, 1991. Cited on page 123.

79 The original no-cloning theorem is by D. Dieks, *Communication by EPR devices*, Physics Letters A **92**, pp. 271–272, 1982, and by W.K. Wootters & W.H. Zurek, *A single quantum cannot be cloned*, Nature **299**, pp. 802–803, 1982. For a discussion of photon and multiparticle cloning, see N. Gisin & S. Massar, *Optimal quantum cloning machines*, Physics Review Letters **79**, pp. 2153–2156, 1997. The whole topic has been presented in detail by V. Buzek & M. Hillery, *Quantum cloning*, Physics World **14**, pp. 25–29, November 2001. Cited on page 123.

80 S.J. Wiesner, *Conjugate Coding*, **SIGACT News**, **15**, pp. 78–88, 1983. This widely cited paper was one of starting points of quantum information theory. Cited on page 123.

81 The most recent experimental and theoretical results on physical cloning are described in A. Lamas-Linares, C. Simon, J.C. Howell & D. Bouwmeester, *Experimental quantum cloning of single photons*, Science **296**, pp. 712 – 714, 2002, D. Collins & S. Popescu, *A classical analogue of entanglement*, preprint arxiv.org/abs/quant-ph/0107082, 2001, and A. Daffertshofer, A.R. Plastino & A. Plastino, *Classical no-cloning theorem*, Physical Review Letters **88**, p. 210601, 2002. Cited on page 124.

82 E. Wigner, *On unitary representations of the inhomogeneous Lorentz group*, Annals of Mathematics **40**, pp. 149–204, 1939. This famous paper summarises the work which later brought him the Nobel Prize in Physics. Cited on pages 126 and 138.

83 For a full list of isotopes, see R.B. Firestone, *Table of Isotopes, Eighth Edition, 1999 Update*, with CDROM, John Wiley & Sons, 1999. Cited on page 128.

84 This is deduced from the $g - 2$ measurements, as explained in his Nobel-prize talk by Hans Dehmelt, *Experiments with an isolated subatomic particle at rest*, Reviews of Modern Physics **62**, pp. 525–530, 1990. On this topic, see also his paper Xem 67. No citations.

and in Hans Dehmelt, *Is the electron a composite particle?*, Hyperfine Interactions **81**, pp. 1–3, 1993.

85 G. Gabrielse, H. Dehmelt & W. Kells, *Observation of a relativistic, bistable hysteresis in the cyclotron motion of a single electron*, Physical Review Letters **54**, pp. 537–540, 1985. No citations.

86 W. Pauli, *The connection between spin and statistics*, Physical Review **58**, pp. 716– 722, 1940. Cited on page 134.

87 The belt trick has been popularized by Dirac, Feynman and many others. An example is R. P. Feynman, *The reason for antiparticles*, in *Elementary Particles and the Laws of Physics: The 1986 Dirac Memorial Lectures*, Cambridge University Press, 1987. The belt trick is also explained, for example, on page 1148 in C. W. Misner, K. S. Thorne & J. A. Wheeler, *Gravitation*, Freeman, 1973. It is called the *scissor trick* on page 43 of volume 1 of R. Penrose & W. Rindler, *Spinors and Spacetime*, 1984. It is also cited and discussed by R. Gould, *Answer to question #7*, American Journal of Physics **63**, p. 109, 1995. Still, some physicists do not like the belt-trick image for spin 1/2 particles; for an example, see I. Duck & E. C. G. Sudarshan, *Toward an understanding of the spin-statistics theorem*, American Journal of Physics **66**, pp. 284–303, 1998. No citations.

88 M. V. Berry & J. M. Robbins, *Indistinguishability for quantum particles: spin, statistics and the geometric phase*, Proceedings of the Royal Society in London A **453**, pp. 1771–1790, 1997. See also the comments to this result by J. Twamley, *Statistics given a spin*, Nature **389**, pp. 127–128, 11 September 1997. Their newer results are M. V. Berry & J. M. Robbins, *Quantum indistinguishability: alternative constructions of the transported basis*, Journal of Physics A (Letters) **33**, pp. L207–L214, 2000, and M. V. Berry & J. M. Robbins, in *Spin–Statistics*, eds. R. Hilborn & G. Tino, American Institute of Physics, 2000, pp. 3–15. See also Michael Berry's home page at www.phy.bris.ac.uk/people/berry_mv. Cited on page 136.

89 R. W. Hartung, *Pauli principle in Euclidean geometry*, American Journal of Physics **47**, pp. 900–910, 1979. Cited on page 137.

90 The issue is treated in his *Summa Theologica*, in question 52 of the first part. The complete text, several thousand pages, can be found on the www.newadvent.org website. Also present-day angelologists, of which there are only a few across the world, agree with Aquinas. Cited on page 137.

91 The point that spin can be seen as a rotation was already made by F. J. Belinfante, *On the spin angular momentum of mesons*, Physica **6**, p. 887, 1939, and taken up again by Hans C. Ohanian, *What is spin?*, American Journal of Physics **54**, pp. 500–505, 1986. See also E. Duran & A. Erschow, Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion **12**, p. 466, 1937. Cited on page 139.

92 See the book by Jean-Marc Lévy-Leblond & Françoise Balibar in Xem 4. Cited on page 142.

93 Generalizations of bosons and fermions are reviewed in the (serious!) paper by O. W. Greenberg, D. M. Greenberger & T. V. Greenbergest, *(Para)bosons, (para)fermions, quons and other beasts in the menagerie of particle statistics*, at arxiv.org/abs/hep-th/9306225. A newer summary is O. W. Greenberg, *Theories of violation of statistics*, electronic preprint available at arxiv.org/abs/hep-th/0007054. Cited on page 143.

94 Gell-Mann wrote this for the 1976 Nobel Conference (not for the Nobel speech; he is the only winner who never published it.) M. Gell-Mann, *What are the building blocks of matter?*, in D. Huff & O. Prewitt, editors, *The Nature of the Physical Universe*, New York, Wiley, 1979, p. 29. Cited on page 144.

95 See e.g. the reprints of his papers in the standard collection by John A. Wheeler &

WOJCIECH H. ZUREK, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, 1983. Cited on page 145.

96 H. D. ZEH, *On the interpretation of measurement in quantum theory*, Foundations of Physics **1**, pp. 69–76, 1970. Cited on page 145.

97 LINDA REICHL, *A Modern Course in Statistical Physics*, Wiley, 2nd edition, 1998. An excellent introduction into thermodynamics. Cited on page 147.

98 E. JOOS & H. D. ZEH, *The emergence of classical properties through interactions with the environment*, Zeitschrift für Physik B **59**, pp. 223–243, 1985. See also ERICH JOOS, *Decoherence and the appearance of a classical world in quantum theory*, Springer Verlag, 2003. Cited on page 148.

99 M. TEGMARK, *Apparent wave function collapse caused by scattering*, Foundation of Physics Letters **6**, pp. 571–590, 1993, preprint at arxiv.org/abs/gr-qc/9310032. See also his paper that shows that the brain is not a quantum computer, M. TEGMARK, *The importance of quantum decoherence in brain processes*, Physical Review E **61**, pp. 4194–4206, 2000, preprint at arxiv.org/abs/quant-ph/9907009. Cited on page 148.

100 The decoherence time is bound from above by the relaxation time. See A. O. CALDEIRA & A. J. LEGGETT, *Influence of damping on quantum interference: an exactly soluble model*, Physical Review A **31**, 1985, pp. 1059–1066. This is the main reference about effects of decoherence for a harmonic oscillator. The general approach to relate decoherence to the influence of the environment is due to Niels Bohr, and has been pursued in detail by Hans Dieter Zeh. Cited on page 150.

101 G. LINDBLAD, *On the generators of quantum dynamical subgroups*, Communications in Mathematical Physics **48**, pp. 119–130, 1976. Cited on page 150.

102 WOJCIECH H. ZUREK, *Decoherence and the transition from quantum to classical*, Physics Today pp. 36–44, October 1991. An easy but somewhat confusing article. His reply to the numerous letters of response in Physics Today, April 1993, pp. 13–15, and pp. 81–90, exposes his ideas in a clearer way and gives a taste of the heated discussions on this topic. Cited on pages 151 and 157.

103 JOHN BARDEEN, explained this regularly in the review talks he gave at the end of his life, such as the one the author heard in Tokyo in the year 1990. Cited on page 151.

104 Collapse times have been measured for the first time by the group of Serge Haroche in Paris. See M. BRUNE, E. HAGLEY, J. DREYER, X. MAITRE, A. MAALI, C. WUNDERLICH, J. M. RAIMOND & S. HAROCHE, *Observing the progressive decoherence of the "meter" in a quantum measurement*, Physical Review Letters **77**, pp. 4887–4890, 1996. See also C. GUERLIN, J. BERNU, S. DELÉGLISE, C. SAYRIN, S. GLEYZES, S. KUHR, M. BRUNE, J.-M. RAIMOND & S. HAROCHE, *Progressive field-state collapse and quantum non-demolition photon counting*, Nature **448**, pp. 889–893, 2007. Cited on pages 151 and 163.

105 Later experiments confirming the numerical predictions from decoherence were published by C. MONROE, D. M. MEEKHOF, B. E. KING & D. J. WINELAND, *A "Schrödinger cat" superposition state of an atom*, Science **272**, pp. 1131–1136, 1996, W. P. SCHLEICH, *Quantum physics: engineering decoherence*, Nature **403**, pp. 256–257, 2000, C. J. MYATT, B. E. KING, Q. A. TURCHETTE, C. A. SACKETT, D. KIELPINSKI, W. M. ITANO, C. MONROE & D. J. WINELAND, *Decoherence of quantum superpositions through coupling to engineered reservoirs*, Nature **403**, pp. 269–273, 2000. See also the summary by W. T. STRUNZ, G. ALBER & F. HAAKE, *Dekohärenz in offenen Quantensystemen*, Physik Journal **1**, pp. 47–52, November 2002. Cited on page 151.

106 L. Hackermüller, K. Hornberger, B. Brezger, A. Zeilinger & M. Arndt, *Decoherence of matter waves by thermal emission of radiation*, Nature **427**, pp. 711–714, 2004. Cited on page 151.

107 K. Baumann, *Quantenmechanik und Objektivierbarkeit*, Zeitschrift für Naturforschung **25a**, pp. 1954–1956, 1970. Cited on page 152.

108 See for example D. Styer, Physics Today p. 11, September 2000. Cited on page 154.

109 David Bohm, *Quantum Theory*, Prentice-Hall, 1951, pp. 614–622. Cited on page 155.

110 A. Einstein, B. Podolsky & N. Rosen, *Can quantum-mechanical description of reality be considered complete?*, Physical Review **48**, pp. 696–702, 1935. Cited on page 155.

111 A. Aspect, J. Dalibard & G. Roger, *Experimental tests of Bell's inequalities using time-varying analyzers*, Physical Review Letters **49**, pp. 1804–1807, 1982, Cited on page 156.

112 G.C. Hergerfeldt, *Causality problems for Fermi's two-atom system*, Physical Review Letters **72**, pp. 596–599, 1994. Cited on page 156.

113 An experimental measurement of superpositions of left and right flowing currents with 10^{10} electrons was J.E. Mooij, T.P. Orlando, L. Levitov, L. Tian, C.H. van der Wal & S. Lloyd, *Josephson persistent-current qubit*, Science **285**, pp. 1036–1039, 1999. In the year 2000, superpositions of 1 μA clockwise and anticlockwise have been detected; for more details, see J.R. Friedman & al., *Quantum superposition of distinct macroscopic states*, Nature **406**, p. 43, 2000. Cited on page 157.

114 On the superposition of magnetization in up and down directions there are numerous papers. Recent experiments on the subject of quantum tunnelling in magnetic systems are described in D. D. Awschalom, J. F. Smith, G. Grinstein, D. P. DiVicenzo & D. Loss, *Macroscopic quantum tunnelling in magnetic proteins*, Physical Review Letters **88**, pp. 3092–3095, 1992, and in C. Paulsen & al., *Macroscopic quantum tunnelling effects of Bloch walls in small ferromagnetic particles*, Europhysics Letters **19**, pp. 643–648, 1992. Cited on page 157.

115 For example, superpositions were observed in Josephson junctions by R.F. Voss & R.A. Webb, *Macroscopic quantum tunnelling in 1 mm Nb Josephson junctions*, Physical Review Letters **47**, pp. 265–268, 1981, Cited on page 157.

116 S. Haroche, *Entanglement, decoherence and the quantum-classical transition*, Physics Today **51**, pp. 36–42, July 1998. An experiment putting atom at two places at once, distant about 80 nm, was published by C. Monroe, C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King & D. J. Wineland, *A 'Schroedinger Cat' Superposition of an Atom*, Science **272**, pp. 1131–1136, 1996. Cited on page 157.

117 M.R. Andrews, C.G. Townsend, H.-J. Miesner, D.S. Durfee, D.M. Kurn & W. Ketterle, *Observations of interference between two Bose condensates*, Science **275**, pp. 637–641, 31 January 1997. See also the www.aip.org/physnews/special.htm website. Cited on page 157.

118 A clear discussion can be found in S. Haroche & J.-M. Raimond, *Quantum computing: dream or nightmare?*, Physics Today **49**, pp. 51–52, 1996, as well as the comments in Physics Today **49**, pp. 107–108, 1996. Cited on page 158.

119 The most famous reference on the wave function collapse is chapter IV of the book by Kurt Gottfried, *Quantum Mechanics*, Benjamin, New York, 1966. It was the favourite reference by Victor Weisskopf, and cited by him on every occasion he talked about the topic. Cited on page 159.

120 The prediction that quantum tunnelling could be observable when the dissipative interaction with the rest of the world is small enough was made by Leggett; the topic

is reviewed in A. J. Leggett, S. Chahravarty, A. T. Dorsey, M. P. A. Fisher, A. Garg & W. Zwerger, *Dynamics of dissipative 2-state systems*, Review of Modern Physics **59**, pp. 1–85, 1987. Cited on page 161.

121 S. Kochen & E. P. Specker, *The problem of hidden variables in quantum mechanics*, Journal of Mathematics and Mechanics **17**, pp. 59–87, 1967. Cited on page 164.

122 J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony & R. A. Holt, *Proposed experiment to test local hidden-variable theories*, Physical Review Letters **23**, pp. 880–884, 1969. The more general and original result is found in J. S. Bell, *On the Einstein Podolsky Rosen Paradox*, Physics **1**, p. 195, 1964. Cited on page 165.

123 D. M. Greenberger, M. A. Horne & A. Zeilinger, *Going beyond Bell's theorem*, postprint of the 1989 paper at arxiv.org/abs/0712.0912. The first observation was D. Bouwmeester, J. -W. Pan, M. Daniell, H. Weinfurter & A. Zeilinger, *Observation of three-photon Greenberger-Horne–Zeilinger entanglement*, preprint at arxiv.org/abs/quant-ph/9810035. Cited on page 165.

124 Bryce de Witt & Neill Graham, eds., *The Many–Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, 1973. This interpretation talks about entities which cannot be observed, namely the many worlds, and often assumes that the wave function of the universe exists. Both habits are beliefs and in contrast with facts. Cited on page 167.

125 'On the other had I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics.' From Richard P. Feynman, *The Character of Physical Law*, MIT Press, Cambridge, 1965, p. 129. He repeatedly made this statement, e.g. in the introduction of his otherwise excellent *QED – The Strange Theory of Light and Matter*, Penguin Books, 1990. Cited on page 168.

126 M. Tegmark, *The importance of quantum decoherence in brain processes*, Physical Review D **61**, pp. 4194–4206, 2000, or also arxiv.org/abs/quant-ph/9907009. Cited on page 169.

127 Connections between quantum theory and information theory can be followed in the International Journal of Quantum Information. Cited on page 169.

128 J. A. Wheeler, pp. 242–307, in *Batelle Recontres: 1967 Lectures in Mathematics and Physics*, C. DeWitt & J. A. Wheeler, editors, W.A. Benjamin, 1968. For a pedagogical explanation, see John W. Norbury, *From Newton's laws to the Wheeler-DeWitt equation*, arxiv.org/abs/physics/980604 or European Journal of Physics **19**, pp. 143–150, 1998. Cited on page 171.

129 The most fascinating book on the topic is by Kurt Nassau, *The Physics and Chemistry of Color – the Fifteen Causes of Color*, 1983, and the excellent webexhibits.org/causesofcolour website. Cited on page 172.

130 Y. Ruiz-Morales & O. C. Mullins, *Measured and Simulated Electronic Absorption and Emission Spectra of Asphaltenes*, Energy & Fuels **23**, pp. 1169–1177, 2009. U. Bergmann, H. Groenzin, O. C. Mullins, P. Glatzel, J. Fetzer & S. P. Cramer, *Carbon K-edge X-ray Raman spectroscopy supports simple, yet powerful description of aromatic hydrocarbons and asphaltenes*, Chemical Physics Letters **369**, pp. 184–191, 2003. Cited on page 172.

131 Two excellent reviews with numerous photographs are E. Grotewohl, *The genetics and biochemistry of floral pigments*, Annual Reviews of Plant Biology **57**, pp. 761–780, 2006, and Y. Tanaka, N. Sasaki & A. Ohmiya, *Biosynthesis of plant pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids*, The Plant Journal **54**, pp. 733–749, 2008. Cited on page 180.

132 L. Pérez-Rodriguez & J. Viñuda, *Carotenoid-based bill and eye coloration as honest signals of condition: an experimental test in the red-legged partridge (Alectoris rufa)*,

Naturwissenschaften **95**, pp. 821–830, 2008, Cited on page 180.

133 R. Pello, D. Schaerer, J. Richard, J. -F. Le Borgne & J. -P. Kneib, *ISAAC/VLT observations of a lensed galaxy at z=10.0*, Astronomy and Astrophysics **416**, p. L35, 2004. Cited on page 183.

134 A pedagogical introduction is given by L. J. Curtis & D. G. Ellis, *Use of the Einstein–Brillouin–Keller action quantization*, American Journal of Physics 72, pp. 1521–1523, 2004. See also the introduction of A. Klein, *WKB approximation for bound states by Heisenberg matrix mechanics*, Journal of Mathematical Physics **19**, pp. 292–297, 1978. Cited on pages 183 and 189.

135 J. Neukammer & al., *Spectroscopy of Rydberg atoms at $n \sim 500$*, Physical Review Letters **59**, pp. 2947–2950, 1987. Cited on page 187.

136 Mark P. Silverman, *And Yet It Moves: Strange Systems and Subtle Questions in Physics*, Cambridge University Press 1993. A beautiful book by an expert on motion. Cited on pages 188 and 195.

137 This is explained by J. D. Hey, *Mystery error in Gamow's Tompkins reappears*, Physics Today pp. 88–89, May 2001. Cited on page 187.

138 The beautiful experiment was first published in A. S. Stodolna, A. Rouzée, F. Lépine, S. Cohen, F. Robicheaux, A. Gijsbertsen, J. H. Jungmann, C. Bordas & M. J. J. Vrakking, *Hydrogen atoms under magnification: direct observation of the nodal structure of Stark states*, Physical Review Letters **110**, p. 213001, 2013. Cited on pages 186 and 187.

139 L. L. Foldy, *The electromagnetic properties of Dirac particles*, Physical Review **83**, pp. 688–693, 1951. L. L. Foldy, *The electron–neutron interaction*, Physical Review **83**, pp. 693–696, 1951. L. L. Foldy, *Electron–neutron interaction*, Review of Modern Physics **30**, pp. 471–481, 1952. Cited on page 191.

140 H. Euler & B. Kockel, *Über die Streuung von Licht an Licht nach der Diracschen Theorie*, Naturwissenschaften **23**, pp. 246–247, 1935, H. Euler, *Über die Streuung von Licht an Licht nach der Diracschen Theorie*, Annalen der Physik **26**, p. 398, 1936, W. Heisenberg & H. Euler, *Folgerung aus der Diracschen Theorie des Electrons*, Zeitschrift für Physik **98**, pp. 714–722, 1936. Cited on page 193.

141 See the simple explanation by L. J. F. Hermans, *Blue skies, blue seas*, Europhysics News **37**, p. 16, 2006, and the detailed explanation by C. L. Braun & S. N. Smirnov, *Why is water blue?*, Journal of Chemical Education **70**, pp. 612–614, 1993. Cited on page 195.

142 The discovery is published in T. Friedmann & C. R. Hagen, *Quantum Mechanical Derivation of the Wallis Formula for* π , Journal of Mathematical Physics **56**, p. 112101, 2015, preprint at arxiv.org/1510.07813. See also I Chashchina & Z. K. Silagadze, *On the quantum mechanical derivation of the Wallis formula for* π, preprint at arxiv.org/1704.06153. Cited on page 195.

143 For the atomic case, see P. L. Gould, G. A. Ruff & D. E. Pritchard, *Diffraction of atoms by light: the near resonant Kapitza–Dirac effect*, Physical Review Letters **56**, pp. 827–830, 1986. Many early experimental attempts to observe the diffraction of electrons by light, in particular those performed in the 1980s, were controversial; most showed only the deflection of electrons, as explained by H. Batelaan, Contemporary Physics **41**, p. 369, 2000. Later on, he and his group performed the newest and most spectacular experiment, demonstrating real diffraction, including interference effects; it is described in D. L. Freimund, K. Aflatooni & H. Batelaan, *Observation of the Kapitza–Dirac effect*, Nature **413**, pp. 142–143, 2001. Cited on page 195.

144 A single–atom laser was built in 1994 by K. An, J. J. Childs, R. R. Dasari & M. S. Feld, *Microlaser: a laser with one atom in an optical resonator*, Physical Review Letters **73**, p. 3375, 1994. Cited on page 196.

145 An introduction is given by P. Pinkse & G. Rempe, *Wie fängt man ein Atom mit einem Photon?*, Physikalische Blätter **56**, pp. 49–51, 2000. Cited on page 196.

146 J.P. Briand & al., *Production of hollow atoms by the excitation of highly charged ions in interaction with a metallic surface*, Physical Review Letters **65**, pp. 159–162, 1990. See also G. Marowsky & C. Rhodes, *Hohle Atome und die Kompression von Licht in Plasmakanälen*, Physikalische Blätter **52**, pp. 991–994, Oktober 1996. Cited on page 196.

147 G. Gabrielse, D. Hanneke, T. Kinoshita, M. Nio & B. Odom, *New determination of the fine structure constant from the electron g value and QED*, Physical Review Letters **97**, p. 030802, 2006. Cited on page 197.

148 A. Sommerfeld, *Zur Quantentheorie der Spektrallinien*, Annalen der Physik **51**, pp. 1–94, 1916, and its continuation with the same title on pp. 125–167 in the same volume. The fine structure constant is introduced in the first paper, but Sommerfeld explains that the paper is a transcript of talks that he gave in 1915. Cited on page 197.

149 Wolfgang Pauli, *Exclusion principle and quantum mechanics*, Nobel lecture, 13 December 1946, in *Nobel Lectures, Physics*, Volume 3, 1942–1962, Elsevier, 1964. Cited on page 198.

150 An informative account of the world of psychokinesis and the paranormal is given by the famous professional magician James Randi, *Flim-flam!*, Prometheus Books, Buffalo 1987, as well as in several of his other books. See also the www.randi.org website. Cited on page 202.

151 *Le Système International d'Unités*, Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, Parc de Saint Cloud, 92310 Sèvres, France. All new developments concerning SI units are published in the journal *Metrologia*, edited by the same body. Showing the slow pace of an old institution, the BIPM launched a website only in 1998; it is now reachable at www.bipm.fr. See also the www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/index.html website; this includes the biographies of people who gave their names to various units. The site of its British equivalent, www.npl.co.uk/npl/reference, is much better; it provides many details as well as the English-language version of the SI unit definitions. No citations.

152 The bible in the field of time measurement is the two-volume work by J. Vanier & C. Audoin, *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards*, Adam Hilge, 1989. A popular account is Tony Jones, *Splitting the Second*, Institute of Physics Publishing, 2000.

The site opdafl.obspm.fr/www/lexique.html gives a glossary of terms used in the field. For precision *length* measurements, the tools of choice are special lasers, such as mode-locked lasers and frequency combs. There is a huge literature on these topics. Equally large is the literature on precision *electric current* measurements; there is a race going on for the best way to do this: counting charges or measuring magnetic forces. The issue is still open. On *mass* and atomic mass measurements, see Volume II, on Trang 73. On high-precision *temperature* measurements, see Volume I, on Trang 545. Cited on page 207.

153 The unofficial SI prefixes were first proposed in the 1990s by Jeff K. Aronson of the University of Oxford, and might come into general usage in the future. See New Scientist **144**, p. 81, 3 December 1994. Other, less serious proposals also exist. Cited on page 208.

154 For more details on electromagnetic unit systems, see the standard text by John David Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd edition, Wiley, 1998. Cited on page 211.

155 D.J. Bird & al., *Evidence for correlated changes in the spectrum and composition of cosmic rays at extremely high energies*, Physical Review Letters **71**, pp. 3401–3404, 1993. Cited on page 212.

156 P. J. Hakonen, R. T. Vuorinen & J. E. Martikainen, *Nuclear antiferromagnetism in rhodium metal at positive and negative nanokelvin temperatures*, Physical Review Letters **70**, pp. 2818–2821, 1993. See also his article in Scientific American, January 1994. Cited on page 212.

157 A. Zeilinger, *The Planck stroll*, American Journal of Physics **58**, p. 103, 1990. Can you find another similar example? Cited on page 212.

Câu đố 179 e

158 An overview of this fascinating work is given by J. H. Taylor, *Pulsar timing and relativistic gravity*, Philosophical Transactions of the Royal Society, London A **341**, pp. 117–134, 1992. Cited on page 212.

159 The most precise clock built in 2004, a caesium fountain clock, had a precision of one part in 10^{15}. Higher precision has been predicted to be possible soon, among others by M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi & H. Katori, *An optical lattice clock*, Nature **435**, pp. 321–324, 2005. Cited on page 212.

160 J. Bergquist, ed., *Proceedings of the Fifth Symposium on Frequency Standards and Metrology*, World Scientific, 1997. Cited on page 212.

161 See the information on $D_s^{\pm}$ mesons from the particle data group at pdg.web.cern.ch/pdg. Cited on page 212.

162 About the long life of tantalum 180, see D. Belic & al., *Photoactivation of* $^{180}Ta^{m}$ *and its implications for the nucleosynthesis of nature's rarest naturally occurring isotope*, Physical Review Letters **83**, pp. 5242–5245, 20 December 1999. Cited on page 213.

163 See the review by L. Ju, D. G. Blair & C. Zhao, *The detection of gravitational waves*, Reports on Progress in Physics **63**, pp. 1317–1427, 2000. Cited on page 213.

164 See the clear and extensive paper by G. E. Stedman, *Ring laser tests of fundamental physics and geophysics*, Reports on Progress in Physics **60**, pp. 615–688, 1997. Cited on page 213.

165 The various concepts are even the topic of a separate international standard, ISO 5725, with the title *Accuracy and precision of measurement methods and results*. A good introduction is John R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis: the Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd edition, University Science Books, Sausalito, 1997. Cited on page 213.

166 P. J. Mohr, B. N. Taylor & D. B. Newell, *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010*, preprint at arxiv.org/abs/1203.5425. This is the set of constants resulting from an international adjustment and recommended for international use by the Committee on Data for Science and Technology (CODATA), a body in the International Council of Scientific Unions, which brings together the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP), the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) and other organizations. The website of IUPAC is www.iupac.org. Cited on page 215.

167 Some of the stories can be found in the text by N. W. Wise, *The Values of Precision*, Princeton University Press, 1994. The field of high-precision measurements, from which the results on these pages stem, is a world on its own. A beautiful introduction to it is J. D. Fairbanks, B. S. Deaver, C. W. Everitt & P. F. Michaelson, eds., *Near Zero: Frontiers of Physics*, Freeman, 1988. Cited on page 215.

168 For details see the well-known astronomical reference, P. Kenneth Seidelmann, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, 1992. Cited on page 221.

169 See the corresponding reference in the first volume. Cited on page 222.

170 A good reference is the *Encyclopedia of Mathematics*, in 10 volumes, Kluwer Academic Publishers, 1988–1993. It explains most concepts used in mathematics. Spending an hour with it looking up related keywords is an efficient way to get an introduction into any part of mathematics, especially into the vocabulary and the main connections.

The opposite approach, to make things as complicated as possible, is taken in the delightful text by Carl E. Linderholm, *Mathematics Made Difficult*, 1971. Cited on page 224.

171 An excellent introduction into number systems in mathematics, including hyperreal (or nonstandard) numbers, quaternions, octonions, *p*-adic and surreal numbers, is the book by Heinz-Dieter Ebbinghaus, Hans Hermes, Friedrich Hirzebruch, Max Koecher, Klaus Mainzer, Jürgen Neukirch, Alexander Prestel & Reinhold Remmert, *Zahlen*, 3rd edition, Springer Verlag, 1993. It is also available in English, under the title *Numbers*, Springer Verlag, 1990. Cited on pages 226, 235, and 236.

172 For a book on how to use hyperreals in secondary school, see Helmut Wunderling, *Analysis als Infinitesimalrechnung*, Duden Paetec Schulbuchverlag, 2007. Cited on page 236.

173 A. Waser, *Quaternions in Electrodynamics*, 2001. The text can be downloaded from various websites. Cited on pages 228 and 233.

174 S. L. Altman, *Rotations, Quaternions and Double Groups*, Clarendon Press, 1986, and also S. L. Altman, *Hamilton, Rodriguez and the quaternion scandal*, Mathematical Magazine **62**, pp. 291–308, 1988. See also J. C. Hart, G. K. Francis & L. H. Kauffman, *Visualzing quaternion rotation*, ACM Transactions on Graphics **13**, pp. 256–276, 1994. The latter can be downloaded in several places via the internet. Cited on page 231.

175 See the fine book by Louis H. Kauffman, *Knots and Physics*, World Scientific, 2nd edition, 1994, which gives a clear and visual introduction to the mathematics of knots and their main applications to physics. Cited on page 231.

176 Gaussian integers are explored by G. H. Hardy & E. M. Wright, *An Introduction to the Theory of Numbers*, 5th edition, Clarendon Press, Oxford, 1979, in the sections 12.2 'The Rational Integers, the Gaussian Integers, and the Integers', pp. 178–180, and 12.6 'Properties of the Gaussian Integers' pp. 182–183. For challenges relating to Gaussian integers, look at www.mathpuzzle.com/Gaussians.html. Cited on page 235.

177 About transfinite numbers, see the delightful paperback by Rudy Rucker, *Infinity and the Mind – the Science and Philosophy of the Infinite*, Bantam, 1983. Cited on page 235.

178 E. I. Butikov, *The rigid pendulum – an antique but evergreen physical model*, European Journal of Physics **20**, pp. 429–441, 1999. D. Easton, *The quantum mechanical tipping pencil – a caution for physics teachers*, European Journal of Physics **28**, pp. 1097–1104, 2007, Cited on page 243.

Công trạng

Lời cám ơn

Many people who have kept their gift of curiosity alive have helped to make this project come true. Most of all, Peter Rudolph and Saverio Pascazio have been – present or not – a constant reference for this project. Fernand Mayné, Anna Koolen, Ata Masafumi, Roberto Crespi, Serge Pahaut, Luca Bombelli, Herman Elswijk, Marcel Krijn, Marc de Jong, Martin van der Mark, Kim Jalink, my parents Peter and Isabella Schiller, Mike van Wijk, Renate Georgi, Paul Tegelaar, Barbara and Edgar Augel, M. Jamil, Ron Murdock, Carol Pritchard, Richard Hoffman, Stephan Schiller, Franz Aichinger and, most of all, my wife Britta have all provided valuable advice and encouragement.

Many people have helped with the project and the collection of material. Most useful was the help of Mikael Johansson, Bruno Barberi Gnecco, Lothar Beyer, the numerous improvements by Bert Sierra, the detailed suggestions by Claudio Farinati, the many improvements by Eric Sheldon, the detailed suggestions by Andrew Young, the continuous help and advice of Jonatan Kelu, the corrections of Elmar Bartel, and in particular the extensive, passionate and conscientious help of Adrian Kubala.

Important material was provided by Bert Peeters, Anna Wierzbicka, William Beaty, Jim Carr, John Merrit, John Baez, Frank DiFilippo, Jonathan Scott, Jon Thaler, Luca Bombelli, Douglas Singleton, George McQuarry, Tilman Hausherr, Brian Oberquell, Peer Zalm, Martin van der Mark, Vladimir Surdin, Julia Simon, Antonio Fermani, Don Page, Stephen Haley, Peter Mayr, Allan Hayes, Igor Ivanov, Doug Renselle, Wim de Muynck, Steve Carlip, Tom Bruce, Ryan Budney, Gary Ruben, Chris Hillman, Olivier Glassey, Jochen Greiner, squark, Martin Hardcastle, Mark Biggar, Pavel Kuzin, Douglas Brebner, Luciano Lombardi, Franco Bagnoli, Lukas Fabian Moser, Dejan Corovic, Paul Vannoni, John Haber, Saverio Pascazio, Klaus Finkenzeller, Leo Volin, Jeff Aronson, Roggie Boone, Lawrence Tuppen, Quentin David Jones, Arnaldo Uguzzoni, Frans van Nieuwpoort, Alan Mahoney, Britta Schiller, Petr Danecek, Ingo Thies, Vitaliy Solomatin, Carl Offner, Nuno Proença, Elena Colazingari, Paula Henderson, Daniel Darre, Wolfgang Rankl, John Heumann, Joseph Kiss, Martha Weiss, Antonio González, Antonio Martos, André Slabber, Ferdinand Bautista, Zoltán Gácsi, Pat Furrie, Michael Reppisch, Enrico Pasi, Thomas Köppe, Martin Rivas, Herman Beeksma, Tom Helmond, John Brandes, Vlad Tarko, Nadia Murillo, Ciprian Dobra, Romano Perini, Harald van Lintel, Andrea Conti, François Belfort, Dirk Van de Moortel, Heinrich Neumaier, JarosThlaw Królikowski, John Dahlman, Fathi Namouni, Paul Townsend, Sergei Emelin, Freeman Dyson, S.R. Madhu Rao, David Parks, Jürgen Janek, Daniel Huber, Alfons Buchmann, William Purves, Pietro Redondi, Damoon Saghian, Wladimir Egorov, Markus Zecherle, Miles Mutka, plus a number of people who wanted to remain unnamed.

The software tools were refined with extensive help on fonts and typesetting by Michael Zedler and Achim Blumensath and with the repeated and valuable support of Donald Arseneau; help came also from Ulrike Fischer, Piet van Oostrum, Gerben Wierda, Klaus Böhncke,

Craig Upright, Herbert Voss, Andrew Trevorrow, Danie Els, Heiko Oberdiek, Sebastian Rahtz, Don Story, Vincent Darley, Johan Linde, Joseph Hertzlinger, Rick Zaccone, John Warkentin, Ulrich Diez, Uwe Siart, Will Robertson, Joseph Wright, Enrico Gregorio, Rolf Niepraschk and Alexander Grahn.

The typesetting and book design is due to the professional consulting of Ulrich Dirr. The typography was much improved with the help of Johannes Küster and his Minion Math font. The design of the book and its website also owe much to the suggestions and support of my wife Britta.

I also thank the lawmakers and the taxpayers in Germany, who, in contrast to most other countries in the world, allow residents to use the local university libraries.

From 2007 to 2011, the electronic edition and distribution of the Motion Mountain text was generously supported by the Klaus Tschira Foundation.

Công trạng phần Film

The hydrogen orbital image and animation of Trang 81 were produced with a sponsored copy of Dean Dauger's software package *Atom in a Box*, available at daugerresearch.com. The coloured animations of wave functions on Trang 91, Trang 95, Trang 96, Trang 100, Trang 110, Trang 191 and Trang 193 are copyright and courtesy by Bernd Thaller; they can be found on his splendid website vqm.uni-graz.at and in the CDs that come with his two beautiful books, Bernd Thaller, *Visual Quantum Mechanics* Springer, 2000, and Bernd Thaller, *Advanced Visual Quantum Mechanics* Springer, 2004. These books are the best one can read to get an intuitive understanding for wave functions and their evolution. The animation of the belt trick on Trang 132 is copyright and courtesy by Greg Egan; it can be found on his website www.gregegan.net/APPLETS/21/21.html. The beautiful animation of the belt trick on Trang 132 and the wonderful and so far unique animation of the fermion exchange on Trang 135 are copyright and courtesy of Antonio Martos. They can be found at vimeo.com/62228139 and vimeo.com/62143283.

Công trạng phần hình ảnh

The photograph of the east side of the Langtang Lirung peak in the Nepalese Himalayas, shown on the front cover, is courtesy and copyright by Kevin Hite and found on his blog thegettingthere.com. The photograph of a glow worm on Trang 14 is copyright and courtesy of John Tyler, and found on his beautiful website at www.johntyler.co.uk/gwfacts.htm. The photograph of a glass butterfly on Trang 16 is copyright and courtesy of Linda de Volder and found on her site at www.flickr.com/photos/lindadevolder. The photograph of a train window on Trang 33 is copyright and courtesy of Greta Mansour and found at her website www.flickr.com/photos/wireful/. The graphics of the colour spectrum on Trang 42 is copyright and courtesy of Andrew Young and explained on his website mintaka.sdsu.edu/GF/explain/optics/rendering.html. The images of photographic film on Trang 43 are copyright and courtesy of Rich Evans. The images of photomultipliers on Trang 43 are copyright and courtesy of Hamamatsu Photonics. The pictures of the low-intensity photon interference experiment of Trang 44 are copyright of the Delft University of Technology, courtesy of Silvania Pereira, and found on the website www.optica.tn.tudelft.nl/education/photons.asp. The photograph of the Compton effect apparatus on Trang 47 was taken by Helene Hoffmann and is courtesy of Arne Gerdes from the University of Göttingen; it is found at the physics teaching website lp.uni-goettingen.de. The graph on Trang 51 is courtesy and copyright of Rüdiger Paschotta and found in his free and wonderful laser encyclopedia at www.rp-photonics.com. The photograph of the Mach–Zehnder interferometer on Trang 52 is copyright and courtesy of Félix Dieu and Gaël Osowiecki and found on their websites www.flickr.com/photos/felixdieu/sets/72157622768433934/ and www.flickr.com/photos/gaeloso/sets/

72157623165826538/. The photograph on page Trang 54 is copyright of John Davis and courtesy of . The telescope mirror interference image on page Trang 58 is copyright and courtesy of Mel Bartels and found on his site www.bbastrodesigns.com. The speckle pattern image is copyright and courtesy of Epzcaw and found on Wikimedia Commons. On page Trang 59, the double slit interference patterns are copyright and courtesy of Dietrich Zawischa and found on his website on beauty and science at www.itp.uni-hannover.de/~zawischa. The interference figure of Gaussian beams is copyright and courtesy of Rüdiger Paschotta and found on his free laser encyclopedia at www.rp-photonics.com. The blue sky photograph on Trang 70 is courtesy and copyright of Giorgio di Iorio, and found on his website www.flickr.com/photos/gioischia/. The images about the wire contact experiment on Trang 70 is courtesy and copyright of José Costa-Krämer and AAPT. The famous photograph of electron diffraction on Trang 77 is copyright and courtesy of Claus Jönsson. The almost equally famous image that shows the build-up of electron diffraction on Trang 78 is courtesy and copyright of Tonomura Akira/Hitachi: it is found on the www.hqrd.hitachi.co.jp/em/doubleslit.cfm website. The hydrogen graph on Trang 86 is courtesy and copyright of Peter Eyland. The photographs of the Aharonov–Bohm effect on Trang 100 are copyright and courtesy of Doru Cuturela. The images of DNA molecules on Trang 102 are copyright and courtesy by Hans-Werner Fink and used with permission of Wiley VCH. The experiment pictures of the bunching and antibunching of ^{3}He and ^{4}He on Trang 121 are from the website atomoptic.iota.u-psud.fr/research/helium/helium.html and courtesy and copyright of Denis Boiron and Jerome Chatin. The molten metal photograph on Trang 173 is courtesy and copyright of Graela and found at flickr.com/photos/alaig. The sparkler photograph on Trang 173 is courtesy and copyright of Sarah Domingos and found at her flickr.com website. The reactor core photograph on Trang 173 is courtesy NASA and found on the grin.hq.nasa.gov website. The discharge lamp photographs on Trang 173 are courtesy and copyright of Pslawinski and found at www.wikimedia.org. The aurora photograph on Trang 173 is courtesy and copyright of Jan Curtis and found at his climate.gi.alaska.edu/Curtis/curtis.html website. The coloured flames photograph on Trang 174 is courtesy and copyright of Philip Evans and found at his community.webshots.com/user/hydrogen01 website. The iceberg photograph on Trang 174 is courtesy and copyright of Marc Shandro and found at his flickr.com/photos/mshandro website. The malachite photograph on Trang 174 is copyright and courtesy of Stephan Wolfsried and found on the www.mindat.org website. The shadow mask photograph on Trang 174 is courtesy and copyright of Planemad and found at the www.wikimedia.org website. The mineral photographs on Trang 174 and later are copyright and courtesy of Rob Lavinsky at irocks.com, and taken from his large and beautiful collection there and at www.mindat.org/photo-49529.html. The narcissus photograph on Trang 175 is courtesy and copyright of Thomas Lüthi and found at his website www.tiptom.ch/album/blumen/. The photograph with a finger with blood on Trang 175 is courtesy and copyright of Ian Humes and found at his website www.flickr.com/photos/ianhumes. The berries photograph on Trang 175 is courtesy and copyright of Nathan Wall and found at his website www.flickr.com/photos/ozboi-z. The photograph of a red-haired woman on Trang 175 is by dusdin and courtesy of Wikimedia. The rare photograph of a living angler fish on Trang 175 is courtesy and copyright of Steve Haddock and found at his website www.lifesci.uscb.edu/~biolum/. The magnetite photograph on Trang 176 is copyright and courtesy of Stephan Wolfsried and found on the www.mindat.org website. The desert photograph on Trang 176 is copyright of Evelien Willemsen, courtesy Raf Verbeelen and found at www.flickr.com/photos/verbeelen. The tenor saxophone photograph on Trang 176 is courtesy and copyright of Selmer at www.selmer.fr. The photograph of zinc oxide on Trang 176 is by Walkerma and courtesy of Wikimedia. The fluorescing quantum dot photograph on Trang 176 is courtesy and copyright of Andrey Rogach, Center for Nanoscience, München. The zirconia photograph on Trang 177 is courtesy and copyright of Gregory Phillips and found at the commons.wikimedia.org website. The Tokyo

sunset on Trang 177 is courtesy and copyright of Altus Plunkett and found at his www.flickr.com/photos/altus website. The blue quartz photograph on Trang 177 is courtesy and copyright 2008 of David K. Lynch and found at his www.thulescientific.com website. The snowman photograph on Trang 178 is courtesy and copyright of Andreas Kostner and found at his www.flickr.com/photos/bytesinmotion website. The endangered blue poison frog photograph on Trang 178 is courtesy and copyright of Lee Hancock and found at the www.treewalkers.org website. The ruby glass photograph on Trang 178 is courtesy and copyright of the Murano Glass Shop and is found at their murano-glass-shop.it website. The photograph of a ring laser with second harmonic generation on Trang 178 is courtesy and copyright of Jeff Sherman and found at his flickr.com/photos/fatllama website. The abalone photograph on Trang 178 is courtesy and copyright of Anne Elliot and found at her flickr.com/photos/annkelliot website. The photograph of polarization colours on Trang 178 is copyright of Nevit Dilmen and courtesy of Wikimedia. The mallard duck photograph on Trang 179 is courtesy and copyright of Simon Griffith and found at his www.pbase.com/simon2005 website. The opal photograph on Trang 179 is courtesy and copyright of Opalsnopals and found at his www.flickr.com website. The aeroplane condensation photograph on Trang 179 is courtesy and copyright of Franz Kerschbaum and found at the epod.usra.edu website. The CD photograph on Trang 179 is courtesy and copyright of Alfons Reichert and found at his www.chemiephysikskripte.de/artikel/cd.htm website. The liquid crystal pattern on Trang 179 is courtesy and copyright of Ingo Dierking and Wiley/VCH; it is found in his wonderful book Ingo Dierking, *Textures of Liquid Crystals*, Wiley-VCH, 2003. See also his website reynolds.ph.man.ac.uk/people/staff/dierking/gallery. The measured colour spectrum on Trang 181 is copyright and courtesy of Nigel Sharp, NOAO, FTS, NSO, KPNO, AURA and NSF. The photograph of a hydrogen discharge on Trang 182 is copyright and courtesy of Jürgen Bauer and found at the beautiful website www.smart-elements.com. The illustrations of hydrogen orbitals on Trang 188 are courtesy of Wikimedia. The images of the nodal atomic structures on Trang 186 are courtesy of Aneta Stodolna and copyright and courtesy of the American Physical Society; they are found at journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.110.213001. The graphs of the squeezed light states on Trang 242 are courtesy of G. Breitenbach and S. Schiller and copyright of Macmillan.

The historical portraits of physicists in the text are in the public domain, except where mentioned. The photograph on the back cover, of a basilisk running over water, is courtesy and copyright by the Belgian group TERRA vzw and found on their website www.terravzw.org. All drawings are copyright by Christoph Schiller. If you suspect that your copyright is not correctly given or obtained, this has not been done on purpose; please contact me in this case.

Bảng tra cứu nhân danh

G

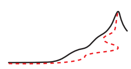
H

F
FINK

W

Y

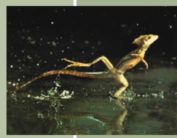
Z



HÀNH SƠN

Cuộc phiêu lưu của Vật lý – Quyển IV

Lượng tử biến đổi



Làm sao để ta có thể thấy những photon đơn lẻ?
Màu sắc đã xuất hiện trong thiên nhiên như thế nào?
'Lượng tử' có nghĩa là gì?
Hiểm hoạ đến từ các hộp đậu là gì?
Tại sao không thể có những cuộc du hành của Gulliver?
Chân không có trống rỗng không?
Nguồn gốc của sự phân rã là gì?
Tại sao thiên nhiên lại có tính ngẫu nhiên?
Có máy sao chép (photocopy) hoàn hảo không?

Qua việc trả lời các câu hỏi về chuyển động, bộ sách này cung cấp cho bạn một phần giới thiệu thú vị và nhức đầu về vật lý hiện đại – vì bạn sẽ ngạc nhiên và bị thử thách trên từng trang sách. Khởi đi từ cuộc sống hằng ngày, cuộc thám hiểm này sẽ cung cấp cho bạn một tổng quan về các thành quả mới nhất trong Cơ học, Nhiệt học, Điện từ học, Thuyết tương đối, Vật lý lượng tử và Lý thuyết thống nhất.

Christoph Schiller, PhD Université Libre de Bruxelles, là một nhà vật lý và là người viết sách phổ cập vật lý. Ông viết bộ sách này cho con mình đọc và cũng dành cho mọi học sinh, giáo viên và độc giả quan tâm đến vật lý - khoa học về sự chuyển động.

Ấn bản miễn phí dạng Pdf có tại
www.motionmountain.net